

*В.С.Верба, Л.Б.Неронский, И.Г.Осипов, В.Э.Турук*



# РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕОБЗОРА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ



**В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук**

**РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ  
СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕОБЗОРА  
КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ**

*Под редакцией  
доктора технических наук, профессора  
В.С. Вербы*

**Издательство «Радиотехника»  
Москва, 2010**

УДК 621.396.96

В31

ББК 32.95

**Научная серия**

**«Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности»**

**Редакционная коллегия:**

**главный редактор** – профессор, докт. техн. наук *В. С. Верба*

**зам. гл. редактора** – профессор, канд. техн. наук *В. И. Меркулов*

**члены редколлегии:** докт. техн. наук С.М. Алексеев; чл.-корр. РАН Л. Д. Бахрах; ст. научн. сотр. В.А. Гандурин; докт. техн. наук, проф. А.П. Курочкин; академик РАН А.Л. Микаэлян; проф., докт. техн. наук Л. Б. Неронский; ст. научн. сотр., канд. техн. наук В.А. Плющев; чл.-корр. РАН А.П. Реутов; проф., докт. воен. наук А.Т. Силкин; докт. техн. наук В.Н. Шахгеданов; чл.-корр. РАН В.Б. Штейншлейгер

**Рецензенты:**

академик РАН *Л.М. Зеленый*; докт. техн. наук, проф. *Г.С. Кондратенков*;

академик РАН *И.Б. Фёдоров*

**Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.**

**В31 Радиолокационные системы землеобзора космического базирования /** Под ред. *В.С. Вербы*. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.: ил. (Научная серия «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности», редактор серии *В. С. Верба*).

**ISBN 978-5-88070-263-3**

Данная монография – третья книга из научной серии «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности» – посвящена новым направлениям построения современных космических систем радиолокационного наблюдения, перспективам их развития, принципам обработки сигналов и использования получаемой информации; обобщает результаты многолетних исследований по созданию глобальной информационной системы, обеспечивающей всепогодное детальное наблюдение динамических процессов, связанных с естественными и антропогенными явлениями на планете Земля. Достигнутые к настоящему времени результаты являются значительным шагом к решению задач исследования природных ресурсов, контроля результатов хозяйственной деятельности, мониторинга катастроф и обеспечения национальной безопасности.

*Книга предназначена для широкого круга специалистов по радиолокации и дистанционному зондированию Земли, инженеров, научных сотрудников, связанных с проектированием геоинформационных систем, созданием и применением средств радиолокационного землеобзора гражданского и военного назначения, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих факультетов и вузов.*

**ISBN 978-5-88070-263-3**

**УДК 621.396.96**

**ББК 32.95**

© Автор, 2010

© Издательство «Радиотехника», 2010

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Отзыв о книге академика РАН Л.М. Зеленого .....	11
От редактора .....	13
Введение .....	17
<b>Глава 1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования в глобальной системе аэрокосмического мониторинга .....</b>	<b>25</b>
1.1. Структура глобальной системы аэрокосмического мониторинга.....	25
1.2. Информационные параметры радиолокационных систем землеобзора космического базирования .....	28
1.3. Применение космических систем радиолокационного наблюдения для видовой разведки при информационном сопровождении военных операций .....	35
1.4. Задачи, решаемые космическими системами радиолокационного наблюдения двойного назначения .....	44
1.5. Концепция использования космических средств радиолокационного наблюдения в глобальной информационной системе и ее национальных сегментах .....	55
<b>Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения .....</b>	<b>59</b>
2.1. Объекты радиолокационного наблюдения и их свойства .....	59
2.2. Спектр электромагнитных колебаний, используемых для наблюдения земной поверхности из космоса .....	60
2.2.1. Диапазоны частот, выделенные Регламентом радиосвязи для радиолокационного зондирования Земли из космоса .....	60
2.2.2. Изобразительные свойства радиолокационных снимков в зависимости от длины волны РСА.....	63
2.2.3. Влияние трассы распространения сигнала на возможности радиолокационного наблюдения в разных диапазонах волн .....	67
2.3. Поляризация радиосигналов при передаче и приеме .....	71
2.4. Отражение электромагнитных волн от сосредоточенных и протяженных объектов и численные характеристики отраженных сигналов .....	74
2.4.1. ЭПР и диаграммы обратного рассеяния простых объектов .....	74
2.4.2. Отражение радиоволн от сложных объектов.....	76
2.4.3. Отражение радиоволн от пространственно распределенных объектов .....	78
2.5. Отражение радиоволн от плоской границы двух сред.....	80
2.6. Отражение радиоволн от поверхности с волнообразными неровностями .....	87
2.7. Отражение радиоволн от поверхности с крупной шероховатостью .....	89
2.8. Отражение радиоволн от двугранных углов .....	89



## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

2.9. Особенности отражения радиоволн от водной поверхности .....	90
2.10. Глубинное (подповерхностное) зондирование .....	96
2.11. Отражение радиоволн от растительного покрова.....	98
2.12. Влияние угла облучения на отражающие характеристики местности .....	100
2.13. Влияние длины радиоволны на отражающую способность местности .....	102
2.14. Флуктуации принимаемого радиосигнала и их связь с геометрией наблюдения .....	105
2.15. Временная изменчивость объектов наблюдения .....	107
<b>Глава 3. Современные методы космического радиолокационного землеобзора. Основные определения.....</b>	<b>109</b>
3.1. Принцип действия и основные характеристики космических радиолокаторов бокового обзора .....	109
3.2. Принцип действия радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны .....	113
3.3. Геометрия обзора при скошенном и бистатическом режимах съемки.....	120
3.3.1. Геометрические соотношения в режиме скошенного обзора .....	120
3.3.2. Многопозиционные космические системы радиолокационного землеобзора .....	123
3.3.3. Геометрия обзора при бистатическом квазизеркальном космическом режиме съемки .....	126
3.3.4. Бистатический режим обзора с подсветом от передающей РЛС на геостационарной орбите.....	128
3.4. Энергетические характеристики космических радиолокаторов землеобзора .....	129
3.5. Радиометрическое разрешение в радиолокаторах землеобзора.....	131
3.5.1. Радиометрическое разрешение в РБО .....	131
3.5.2. Радиометрическое разрешение в РСА.....	135
3.6. Факторы, определяющие выбор параметров РСА. Функция неопределенности сигналов .....	136
3.6.1. Вид функции неопределенности сигналов в космических РСА.....	136
3.6.2. Неоднозначность сигналов РСА по азимуту .....	139
3.6.3. Неоднозначность сигналов РСА по дальности.....	142
3.7. Особенности работы систем радиолокационного наблюдения космического базирования при воздействии активных помех.....	145
<b>Глава 4. Режимы работы космических РСА .....</b>	<b>151</b>
4.1. Основные режимы радиолокационного обзора.....	151
4.1.1. Маршрутный режим обзора .....	151
4.1.2. Широкозахватный режим Скансар .....	153
4.1.3. Прожекторный режим обзора .....	156
4.1.4. Поляриметрические режимы радиолокационной съемки .....	158
4.1.5. Интерферометрическая радиолокационная съемка .....	160

## Оглавление

4.2. Расширенные режимы обзора космических РСА .....	164
4.2.1. Метод двойного приема .....	164
4.2.2. Широкозахватные режимы с высоким разрешением .....	166
4.2.3. Повышение разрешающей способности в поперечном направлении путем межвитковой интерферометрии .....	168
4.2.4. Режимы индикации движущихся целей .....	172
<b>Глава 5. Расчет параметров траекторного сигнала при космическом радиолокационном обзоре .....</b>	<b>181</b>
5.1. Состав параметров траекторного сигнала .....	181
5.2. Системы координат, используемые при радиолокационном обзоре .....	183
5.3. Временные зависимости фазы и амплитуды принимаемого сигнала в РСА .....	186
5.4. Расчет параметров траекторного сигнала при движении платформы по круговой орбите .....	191
5.5. Временная зависимость наклонной дальности цели при движении платформы по Кеплеровой орбите .....	197
5.6. Параметры сигналов, принимаемых антенной РСА .....	208
5.6.1. Система координат, адаптированная к геометрии радиолокационного обзора .....	208
5.6.2. Зависимости доплеровской частоты принимаемого сигнала от аргумента широты КА .....	211
5.6.3. Тангенциальная составляющая скорости относительного движения .....	213
5.6.4. Масштабы радиолокационного изображения .....	215
5.6.5. Ширина спектра доплеровских частот принимаемого сигнала .....	218
5.6.6. Временной закон изменения наклонной дальности точки визирования. Разрешение РСА по азимуту .....	219
5.6.7. Сравнение Кеплерова движения с возмущенным движением КА .....	221
5.7. Связь между углами ориентации КА и направлением визирования .....	223
5.8. Влияние ориентации КА на радиальную скорость относительного движения .....	228
5.9. Баллистические данные для расчета опорной функции синтеза изображения .....	230
<b>Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА .....</b>	<b>233</b>
6.1. Этапы обработки радиолокационных сигналов и вид информационных продуктов .....	233
6.2. Параметры, характеризующие миграцию дальности в радиоголограмме .....	236
6.3. Оптическая обработка радиоголограммы как модель формирования радиолокационного изображения в РСА .....	239
6.4. Алгоритмы цифрового синтеза РЛИ без учета миграции дальности .....	246
6.4.1. Алгоритм прямой свертки .....	246
6.4.2. Алгоритм быстрой свертки .....	251
6.4.3. Алгоритм гармонического (спектрального) анализа .....	253

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

6.5. Процедуры масштабирования и интерполяции комплексных сигналов .....	254
6.5.1. Масштабирование путем свертки с ЛЧМ-опорой .....	254
6.5.2. Расширение массива данных заполнением нулями .....	258
6.5.3. Интерполяция комплексных процессов методом «раздвижки спектра» .....	260
6.6. Алгоритмы синтеза РЛИ в маршрутном режиме с учетом миграции дальности .....	261
6.7. Особенности принимаемых сигналов в прожекторном режиме съемки.....	268
6.8. Унифицированный алгоритм синтеза изображения в основных режимах работы РСА .....	272
6.9. Алгоритм синтеза РЛИ в прожекторном режиме с когерентным накоплением в субкадрах .....	275
6.9.1. Интерполяция радиоголограммы по азимуту.....	275
6.9.2. Когерентное накопление парциальных спектров.....	276
6.9.3. Когерентное накопление субкадров .....	279
6.10. Автофокусировка радиолокационных изображений.....	279
6.10.1. Искажающие воздействия, требующие применения автофокусировки РЛИ .....	279
6.10.2. Аналитическая оценка влияния ошибок фокусирования .....	281
6.10.3. Влияние ошибок фокусирования на форму отклика при амплитудном взвешивании.....	288
6.10.4. Влияние погрешностей измерения координат КА, трассы распространения сигнала и рельефа местности на точность фокусировки РЛИ.....	290
6.10.5. Обзор алгоритмов автофокусировки .....	296
6.10.6. Фазово-градиентный алгоритм автофокусировки .....	302
6.10.7. Процедура поиска откликов для автофокусировки РЛИ.....	313
6.10.8. Локальная автофокусировка РЛИ высокого разрешения.....	317
6.11. Особенности синтеза РЛИ в режимах скошенного и бистатического обзоров .....	320
6.12. Синтез РЛИ в видеоимпульсных РСА .....	322
6.13. Современные тенденции создания программно-аппаратных комплексов для синтеза радиолокационных изображений .....	330
<b>Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений.....</b>	<b>335</b>
7.1. Методы фильтрации спекл-шума на РЛИ .....	335
7.1.1. Задачи некогерентной обработки РЛИ .....	338
7.1.2. Варианты и характеристики процедуры некогерентного накопления.....	339
7.1.3. Базовые алгоритмы фильтрации спекл-шума .....	348
7.1.4. Модернизированные алгоритмы фильтрации спекл-шума. Применение вейвлет-преобразования.....	353
7.1.5. Метод нелокального усреднения спекл-шума .....	361
7.2. Регистрация радиолокационной информации .....	363
7.2.1. Требования к регистрации радиоголограммы.....	363
7.2.2. Динамический диапазон выходных радиолокационных изображений .....	365
7.2.3. Параметры регистрации радиолокационных изображений .....	369

## Оглавление

7.3. Характеристики зрительного восприятия РЛИ .....	370
7.4. Отображение радиолокационной информации .....	379
7.4.1. Структурная схема модели преобразования информации при визуальном дешифрировании РЛИ .....	379
7.4.2. Линейный регистратор с ограничением .....	383
7.4.3. Отображение РЛИ на дисплее .....	386
7.4.4. Получение твердой копии РЛИ на бумажном носителе .....	391
7.5. Характеристики цветного и псевдоцветного отображения РЛИ .....	402
<b>Глава 8. Повышение информативности космических РСА .....</b>	<b>405</b>
8.1. Учет влияния нелинейностей в тракте РСА .....	405
8.2. Подавление помех неоднозначности по дальности в РСА .....	417
8.3. Подавление помех неоднозначности по азимуту в РСА высокого разрешения .....	421
8.4. Методы расширенной обработки радиолокационных изображений .....	426
8.5. Сжатие потока данных, передаваемых по радиолинии .....	427
<b>Глава 9. Современные подходы к тематической обработке радиолокационной информации .....</b>	<b>431</b>
9.1. Цели, задачи и методы тематической обработки радиолокационной информации .....	431
9.2. Формирование банков радиолокационных портретов объектов наблюдения .....	435
9.2.1. Исходные материалы, получаемые самолетными и космическими РСА высокого разрешения .....	435
9.2.2. Получение точечных моделей объектов наблюдения .....	437
9.3. Контроль надводной обстановки .....	440
9.3.1. Общие требования к решению задачи контроля надводной обстановки .....	440
9.3.2. Обнаружение морских целей .....	442
9.3.3. Измерение координат морских целей .....	444
9.3.4. Радиолокационные портреты морских целей .....	448
9.3.5. Радиолокационные портреты движущихся целей в условиях морского волнения .....	450
9.3.6. Классификация морских целей .....	452
9.4. Дистанционное зондирование морской поверхности .....	452
9.4.1. Задачи дистанционного зондирования морской поверхности .....	452
9.4.2. Обнаружение эффектов взаимодействия взволнованной морской поверхности с атмосферой .....	452
9.4.3. Оценка скорости морских течений .....	455
9.4.4. Экологический мониторинг морских акваторий .....	459
9.4.5. Исследования проявлений внутренних волн для выявления топографии дна .....	463
9.4.6. Обнаружение опасных волновых явлений и их предвестников .....	464
9.5. Исследование ледового покрова .....	465
9.6. Зондирование суши и растительного покрова .....	467
9.6.1. Тематическое картирование объектов суши .....	467
9.6.2. Мониторинг растительного покрова .....	469

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

9.6.3. Некогерентные методы выявления изменений в оперативной обстановке .....	473
9.6.4. Построение цифровых карт рельефа по радиолокационным стереоснимкам .....	475
9.7. Интерферометрическая обработка радиолокационных снимков .....	476
9.7.1. Получение цифровых карт рельефа местности .....	476
9.7.2. Дифференциальная интерферометрия для обнаружения изменений в обстановке и измерения малых смещений объектов .....	480
9.7.3. Интерферометрическая обработка результатов поляриметрического зондирования .....	483
9.8. Методы решения координатных задач по данным радиолокационного зондирования .....	486
9.8.1. Исходные данные для решения координатных задач по РЛИ .....	486
9.8.2. Решение координатной задачи по одиночному РЛИ .....	486
9.8.3. Определение элементов внешнего ориентирования антенны .....	489
9.8.4. Решение координатной задачи по стереопаре РЛИ земной поверхности .....	491
9.8.5. Совместная обработка перекрывающихся космических фотоснимков и РЛИ ...	493
<b>Глава 10. Технологии моделирования характеристик аппаратуры РЛН и процессов прохождения сигналов в радиолокационном тракте .....</b>	<b>499</b>
10.1. Исходные положения .....	499
10.2. Подготовка исходного материала для моделирования .....	501
10.3. Моделирование обработки сигналов в РСА .....	504
10.4. Моделирование интерферометрической обработки изображений .....	505
10.5. Моделирование индикации движущихся целей .....	506
10.6. Структура математической модели сквозного тракта РСА .....	506
10.7. Полунаатурное моделирование при отработке и испытаниях аппаратуры РСА .....	509
<b>Глава 11. Калибровка РСА .....</b>	<b>511</b>
11.1. Методики оценки характеристик информационных продуктов РСА .....	511
11.1.1. Типы информационных продуктов .....	511
11.1.2. Оценка пространственного разрешения .....	513
11.1.3. Вычисление импульсного отклика РСА по получаемым снимкам .....	516
11.1.4. Оценка уровня боковых лепестков импульсного отклика РСА .....	518
11.1.5. Оценка радиометрического разрешения РСА .....	518
11.1.6. Оценка динамического диапазона и линейности амплитудной характеристики РЛИ .....	518
11.1.7. Интегральный эвристический критерий оценки информативности космических РСА .....	519
11.2. Методы и средства калибровки .....	523
11.3. Состав калибруемой аппаратуры космических РСА .....	524
11.4. Технологическая цепочка калибровки РСА .....	526
11.5. Методы предполетной калибровки РСА .....	528
11.6. Методы оценки параметров аппаратуры РСА в полете и коррекции искажений при обработке информации .....	531

## Оглавление

11.7. Калибровка тракта обработки сигналов и выходного информационного продукта.....	540
11.8. Состав наземного оборудования средств калибровки .....	543
11.9. Радиометрическая коррекция радиоголограммы при работе быстродействующей АРУ.....	545
<b>Глава 12. Совершенствование аппаратуры радиолокационных комплексов землеобзора космического базирования .....</b>	<b>549</b>
12.1. Системный подход к проектированию космической аппаратуры радиолокационного наблюдения.....	549
12.2. Антенные устройства космических РСА.....	550
12.2.1. Общие требования к антеннам для космических РСА .....	550
12.2.2. АФАР для космического РСА X-диапазона волн.....	551
12.2.3. Совмещенная двухдиапазонная АФАР L- и P-диапазонов волн.....	553
12.2.4. Гибридная зеркальная антенна S-диапазона волн для РСА в составе малого космического аппарата .....	554
12.2.5. Гибридная зеркальная антенна с АФАР-облучателем.....	556
12.2.6. Активные антенные решетки и их элементы для видеоимпульсных РСА .....	557
12.2.7. Перспективы развития антенных систем для РСА космического базирования.....	564
12.3. Генераторы частот и сигналов для космических РСА .....	565
12.4. Характеристики транзисторных усилителей мощности, работающих в импульсном режиме .....	568
12.5. Совершенствование приемопередающих модулей применительно к гибридным зеркальным антеннам с АФАР-облучателями.....	573
12.6. Требования к приемному тракту РСА .....	575
<b>Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения земной поверхности и наземных (надводных) объектов .....</b>	<b>577</b>
13.1. Этапы создания космической аппаратуры радиолокационного наблюдения .....	577
13.2. Некогерентные космические радиолокаторы бокового обзора для наблюдения океана и надводной обстановки .....	579
13.2.1. Некогерентные РБО контроля надводной обстановки. Бортовой комплекс «Чайка» .....	579
13.2.2. Космические РБО для исследования морской поверхности, ледяного и ледникового покровов.....	581
13.3. Ретроспективный обзор развития космических РСА.....	583
13.3.1. РСА космического аппарата SEASAT .....	583
13.3.2. Космические РСА L-диапазона волн SIR-A, SIR-B, JERS-1 .....	585
13.3.3. РСА «Меч-К», «Меч-КУ» космических аппаратов «Космос-1870» и «Алмаз-1» .....	588
13.3.4. Программа ERS космического агентства ESA .....	594
13.3.5. Многорежимный РСА С-диапазона волн Radarsat-1 .....	595
13.3.6. Космические РСА видовой разведки серии Lacrosse.....	597
13.3.7. Многочастотные поляриметрические РСА SIR-C/X-SAR многоорбитального космического корабля Space Shuttle.....	600

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

13.4. Разработки космических РСА, обеспечившие создание научно-технического задела .....	602
13.4.1. Многорежимный космический РСА LightSAR для малого КА .....	602
13.4.2. Двухчастотный РСА «Траверс» модуля «Природа» космической станции МИР .....	603
13.4.3. Многочастный бортовой радиолокационный комплекс КА «Алмаз-1В».....	605
13.4.4. Многочастный поляриметрический бортовой радиолокационный комплекс «Аркон-2» .....	606
13.5. Состояние и перспективы развития РСА землеобзора космического базирования .....	608
13.5.1. Поляриметрический РСА С-диапазона волн ASAR космического аппарата ENVISAT .....	610
13.5.2. Многорежимный поляриметрический РСА С-диапазона волн Radarsat-2 ....	612
13.5.3. Поляриметрические РСА L-диапазона волн PALSAR космического аппарата ALOS .....	614
13.5.4. Орбитальная группировка SAR Lupe .....	617
13.5.5. Космические аппараты Cosmo SkyMed.....	618
13.5.6. РСА TerraSAR-X .....	620
13.5.7. РСА TECSAR.....	622
13.5.8. Индийский РСА RISAT-1 .....	623
13.5.9. Перспективный РСА TerraSAR-L.....	624
13.5.10. Радиолокатор «Северянин-М» КА «Метеор-М» №1 космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения.....	626
13.5.11. РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» .....	627
13.5.12. Проект двухчастотного БРЛК для мониторинга объектов топливно-энергетического комплекса «Смотр-SP» .....	632
<b>Заключение .....</b>	<b>635</b>
<b>Литература.....</b>	<b>637</b>
<b>Перечень принятых сокращений .....</b>	<b>665</b>
<b>Основные обозначения в формулах и физические параметры .....</b>	<b>667</b>
<b>Сведения об авторах .....</b>	<b>699</b>
<b>Monograph structure .....</b>	<b>671</b>

---

*Выход в свет монографии «Радиолокационные системы землеобзора космического базирования» в научной серии «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности» в издательстве «Радиотехника» представляется чрезвычайно своевременным явлением.*

*Спутниковая радиолокация является на сегодняшний день одним из важнейших наиболее успешно и динамично развивающихся направлений дистанционного зондирования Земли из космоса. Стремительное развитие этого направления привело к насущной необходимости собрать воедино, систематизировать и подвергнуть тщательному анализу научно-технические достижения последних лет и новые идеи в деле создания и развития радиолокационных систем, технологий обработки, хранения, интерпретации и использования получаемых данных, обобщить информацию о разрабатываемых и уже реализованных проектах.*

*Основу спутниковой радиолокации составляют разработки методов и аппаратуры, обеспечивающих формирование радиолокационных изображений земной поверхности с высоким пространственным разрешением, которые служат информационным обеспечением при решении широкого круга задач научного, народно-хозяйственного и оборонного характера. Получение таких радиолокационных изображений стало возможным вследствие разработки и практического освоения специфического метода радиолокации - метода синтеза апертуры антенны. Особо хочется подчеркнуть, что авторы монографии являются пионерами создания радиолокаторов с синтезированной апертурой в России, что позволяет читателю получить информацию «из первых рук». В монографии отражено изменяющееся и развивающееся содержание современной радиолокации, приведён обзор всех основных отечественных и зарубежных радиолокационных систем спутникового базирования с анализом их характеристик, возможностей и ограничений. Безусловную ценность представляют результаты многолетних научных исследований и прикладных разработок авторов, отражающие их реальный вклад в развитие систем и методов радиолокационного спутникового зондирования.*

*К несомненным достоинствам книги следует отнести то, что она объединяет две взаимосвязанные и взаимодополняющие задачи. Она включает в себя не только последовательно проведенный анализ теоретических основ и осо-*



## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

---

бенностей радиолокационных методов и построения радиолокационных систем, но и обзор наиболее впечатляющих научных результатов, полученных при помощи таких систем. Главы, посвященные современным подходам к тематической обработке радиолокационной информации применительно к широкому кругу задач исследования процессов и явлений в океане и атмосфере над ним, исследованию ледового покрова, мониторингу растительного покрова и объектов суши, предоставляют возможность широкому кругу специалистов получить систематизированное представление о возможностях метода спутниковой радиолокации и о его месте в схеме глобального мониторинга.

Нельзя не отметить, что книга написана с большим мастерством. Изложение построено таким образом, чтобы читатель получил необходимые и наиболее полные сведения о современном уровне развития проблемы. Несмотря на то, что во многих ВУЗах вводятся специальности или читаются спецкурсы по проблемам и методам дистанционного зондирования Земли, набор серьезной литературы, дающей представление о теоретических основах, современных возможностях и практических достижениях в области спутниковой радиолокации, весьма ограничен. Хочется надеяться, что монография заполнит этот пробел и послужит важным вкладом в расширение научного кругозора молодых ученых и понимание ими различных аспектов радиолокационного зондирования Земли, а также окажется интересной и полезной как специалистам в области спутниковой радиолокации, так и широкому кругу читателей.

Директор  
Учреждения Российской академии наук  
Институт космических исследований РАН  
академик РАН



Л.М. Зеленый

---

*Отечественным ученым, конструкторам, инженерам,  
испытателям, военным специалистам – создателям  
первых в мире космических радиолокаторов землеобзора  
п о с в я щ а е т с я ...*

## **От редактора**

Монография «Радиолокационные системы землеобзора космического базирования» – третья книга из научной серии «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности», посвящена новым направлениям построения современных космических систем радиолокационного наблюдения, перспективам их развития, принципам обработки и использования получаемой информации. Монография обобщает результаты многолетнего освоения космического пространства с целью создания глобальной информационной системы, обеспечивающей всепогодное детальное наблюдение динамических процессов, связанных с естественными и антропогенными явлениями на планете Земля.

Рассматриваются задачи радиолокационного наблюдения земной и морской поверхности, наземных и надводных объектов, характеризующиеся общим термином «землеобзор», который включает в себя дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), мониторинг хозяйственной деятельности и природных воздействий, радиовидение.

В монографии изложены теоретические основы и имеющийся научно-технический задел для проектирования космических систем радиолокационного землеобзора, совершенствования методов получения и обработки радиолокационной информации с учетом опыта разработок коллектива ОАО «Концерн «Вега».

Высокая информативность современных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) с метровым и субметровым пространственным разрешением, особенности взаимодействия радиоволн с объектами наблюдения, возможность оперативного получения информации независимо от времени суток и метеорологических условий, и, наконец, глобальный охват районов съемки обуславливают приоритетную роль космических средств радиолокационного наблюдения для решения задач военной видовой разведки (в сочетании с информацией от оптоэлектронных датчиков) и обеспечения национальной безопасности.

Монография написана на основе только открытой отечественной и зарубежной литературы (справочники, монографии, статьи, учебные пособия, рекламные проспекты), а также открытых публикаций сотрудников ОАО «Концерн «Вега», включающих более чем полувековой уникальный опыт создания аппаратуры авиационно-космического базирования для наблюдения Земли и околоземного пространства.

Книга состоит из предисловия, введения, основного материала (13 глав), заключения и списка литературы. Во введении дается краткий обзор развития космических средств радиолокационного наблюдения (землеобзора). В главах основного материала изложены роль космического сегмента в построении глобальной информационной системы двойного применения, особенности взаимодействия радиоволн с земными покровами и объектами наблюдения, принципы построения, режимы работы и реализуемые характеристики космических радиолокаторов землеобзора, геометрия

обзора, связь характеристик принимаемых сигналов с параметрами орбитального движения космического аппарата с РСА. Рассмотрены вопросы синтеза радиолокационных изображений, их первичной и вторичной обработки, а также методы повышения информативности РСА с учетом аппаратурных ограничений.

Изложены современные подходы к тематической обработке радиолокационной информации, формированию банка радиолокационных данных, автоматизации процесса интерпретации радиолокационной информации. Приведены алгоритмы моделирования процессов преобразования сигналов в тракте РСА, методы оценки качества изображения, вопросы калибровки выходного информационного продукта и коррекции аппаратурных искажений.

Рассмотрены основные аппаратурные решения при создании современных РСА, дан ретроспективный обзор развития космических средств радиолокационного землеобзора и обнаружения объектов.

При изложении материала особое внимание уделено новым режимам работы РСА (скошенного обзора, двойного приема, широкозахватного режима высокого разрешения, возможностям повышения разрешения поперек линии пути посредством использования серии интерферометрических снимков). Детально рассмотрены особенности геометрии космического обзора, включая случаи высокоорбитальных РСА и РСА на геосинхронной орбите. Изложены наиболее эффективные для случая космических РСА алгоритмы синтеза радиолокационного изображения (РЛИ) высокого разрешения, методы автофокусировки РЛИ с учетом погрешностей баллистической информации и ошибок в трассе распространения.

Освещены современные методы последдетекторной обработки РЛИ, включая вейвлет преобразования и нелокальную фильтрацию. Проанализированные вопросы регистрации РЛИ с учетом параметров отображающих устройств и характеристик зрительного восприятия, в том числе с применением псевдоцветной индикации.

Особое внимание уделено алгоритмам моделирования преобразования сигналов в сквозном тракте РСА с использованием экспериментальных комплексных изображений. Они могут быть эффективно применены при проектировании РСА, наземной отработке аппаратуры, при анализе нештатных ситуаций в процессе эксплуатации РСА, а также интерпретации данных радиолокационного зондирования.

В конце текста проведены аннотация и структура книги на английском языке.

В монографии приведен большой список литературы для углубленного изучения материалов по конкретным проблемам. В приложении приведены перечень публикаций создателей радиолокаторов в коллективе ОАО «Концерн «Вега» и участников работ из смежных организаций (более 90 названий), а также перечень работ, посвященных уникальным результатам дистанционного зондирования Земли в 10-см диапазоне волн с использованием РСА «Меч-К» и «Меч-КУ», в том числе в рамках международных экспериментов.

Часть ссылок, приведенных в списке литературы, например, на англоязычные издания отечественных авторов, дублируют статьи на русском языке. Это сделано в связи с их большей доступностью (включая онлайн-ресурсы), чем оригинальные публикации в трудах конференций, изданных малым тиражом. В тексте книги для облегчения поиска дополнительных материалов по ключевым словам приведен в

### От редактора

---

скобках их перевод на английский язык. При написании математических формул применена латиница, что упрощает их программирование в среде MATLAB/Mathcad при инженерных расчетах и моделировании РСА.

Монография иллюстрирована большим количеством радиолокационных изображений, полученных с помощью отечественных и зарубежных космических РСА, включая изображения РСА TerraSAR-X с разрешением от 1 м, любезно предоставленные фирмой Infoterra GmbH© [530].

Книга предназначена для широкого круга специалистов по радиолокации и дистанционному зондированию Земли – инженеров, научных сотрудников, связанных с проектированием информационных систем, созданием и применением средств радиолокационного наблюдения гражданского и военного назначения, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих факультетов и вузов.

Авторы надеются, что данная монография станет настольной книгой разработчика радиолокаторов землеобзора космического (а по общим вопросам — и самолетного) базирования. Уверенность в этом поддерживают и отзывы первых читателей книги – ее рецензентов.

Отзыв доктора физико-математических наук, профессора, академика РАН **Льва Матвеевича Зеленого**, директора Института космических исследований РАН приведен в начале книги.

Заслуженный деятель науки и техники РФ, Лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор **Геннадий Степанович Кондратенков**, Почетный профессор ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, один из основоположников развития теории РСА и радиовидения, их реализации в самолетной аппаратуре, в своем отзыве отмечает, что предлагаемая книга *«является первой отечественной монографией, содержащей системное изложение знаний, относящихся к решению научных, хозяйственных и военных задач землеобзора из космоса с помощью радиолокационных систем. По своему комплексному подходу, широте и глубине изложения, и практической направленности данная монография значительно превосходит недавно изданную книгу американских авторов Pillai, Li, Hamed «Space Based Radar», McGrawHill, 2008 г.*

*В монографии поставлены и разработаны алгоритмы решения практически всех задач радиолокационного обзора из космоса. Это концепция использования радиолокационных комплексов в глобальной информационной системе, методы радиолокационного землеобзора из космоса, принципы построения космических радиолокационных систем, алгоритмы формирования детальных радиолокационных изображений, их тематической обработки и регистрации, вопросы проектирования аппаратуры, моделирования и калибровки, обзор современных и перспективных систем землеобзора космического базирования.*

*Важной особенностью монографии является оценка использования космических радиолокационных систем для решения многочисленных хозяйственных задач и их рыночная привлекательность...*

*Публикация данной монографии, несомненно, будет важной вехой в развитии науки и техники радиолокационных систем землеобзора космического базирования».*

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

В отзыве Заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, профессора, академика РАН **Игоря Борисовича Федорова**, ректора МГТУ им. Н.Э.Баумана, заведующего кафедрой «Радиоэлектронные системы и устройства» отмечено, что «в монографии обобщен и систематизирован мировой опыт создания и применения космических систем радиолокационного землеобзора и, что особенно важно, – вклад в мировую науку и технику непосредственных участников разработки отечественных радиолокационных информационных систем ОАО «Концерн «Вега», создавшего непревзойденный в нашей стране научно-технический задел в этой области техники.

Достоинством книги является системный подход к проектированию радиолокационного сегмента сетцентрических информационных технологий, исчерпывающая полнота рассмотрения всего круга вопросов, касающихся разработки современных систем радиолокационного наблюдения космического базирования гражданского (дистанционное зондирование Земли) и военного (видовая разведка) применения...

Благодаря высокому научному и инженерному уровню, доступному языку изложения, глубокой проработке основных вопросов создания и использования систем радиолокационного землеобзора двойного применения, широкому охвату представленного в ней оригинального материала, а также подробному библиографическому списку с ссылками на публикации для углубленного изучения отдельных вопросов, монография, несомненно, станет настольной книгой для инженеров-разработчиков радиолокационных систем, специалистов по дистанционному зондированию Земли и послужит дальнейшему развитию передовых информационных технологий».

Авторы благодарят коллектив специалистов Открытого акционерного общества «Концерн радиостроения «Вега», чей опыт создания отечественной аппаратуры радиолокационного наблюдения обобщен в настоящей монографии. Особую благодарность авторы выражают докт. техн. наук., проф. **В.Г.Елюшкину**, докт. техн. наук., проф. **А.П.Курочкину**, канд. техн. наук **С.Г.Лиханскому**, канд. физ.-мат. наук **В.Ф.Лосю**, **В.Ю.Манакову**, канд. техн. наук **А.Г.Островскому**, канд. техн. наук **В.А.Плющеву**, докт. техн. наук., проф. **Е.Ф.Толстову** за предоставление материалов в книгу и ценные замечания, способствующие ее улучшению, а также **Г.В.Гладиштейн** и **В.В.Радченко** за их труд по подготовке рукописи к печати.

Авторы будут признательны за все замечания и предложения по содержанию книги, которые просим присылать в Издательство «Радиотехника» по адресу: 107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/б.

Телефон Издательства: +7-495-625-92-41, телефон/факс: +7-495-621-48-37, e-mail: info@radiotec.ru

Доктор технических наук,  
профессор



**Верба В.С.**

---

## Введение

Радиолокационные системы землеобзора космического базирования являются эффективным средством получения оперативной и долговременной информации о состоянии и динамике объектов и районов земного шара в глобальных и региональных масштабах независимо от метеорологических условий и времени суток.

Научные и инженерные основы для реализации таких систем заложены в середине прошлого века. Они были подготовлены достижениями в области самолетного приборостроения, в том числе разработкой в НИИ-17<sup>1</sup> панорамной РЛС «Кобальт» для бортового комплекса прицельного оборудования «Рубидий» бомбардировщика Ту-4 (1949). С помощью этой аппаратуры решались задачи навигации и прицеливания по крупным площадным объектам в отсутствии оптической видимости.

Совершенствование аппаратуры (внедрение перестройки частоты, цветной индикации, автоматического обнаружения объектов на земной поверхности и др.), а главное, переход от панорамных РЛС к радиолокаторам бокового обзора (РБО) с улучшенным угловым разрешением по азимуту (до 9...15 угл. мин), способствовало развитию нового применения радиолокации – *землеобзора* [153\*, 222\*]<sup>2</sup>.

Интенсивные исследования по совершенствованию радиолокаторов землеобзора, выполненные в 1958–1961 гг. практически одновременно в СССР (ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского) и в США (Мичиганский технологический институт), привели к созданию принципиально новых средств радиолокационного наблюдения – *когерентных радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны* (РСА), способных решать задачи *радиовидения* с пространственным разрешением в единицы и доли метра. Метод повышения угловой разрешающей способности РЛС путем создания искусственной антенны с когерентным суммированием сигналов, принятых вдоль траектории полета (Г.С. Кондратенков, авт. свид. 1959 г. [116] с приоритетом на год раньше американского патента), был экспериментально подтвержден с помощью РСА 70-сантиметрового диапазона волн в ходе проведенной в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского НИР «Азимут» (научный руководитель НИР А.П. Реутов) [116, 146]. С этих первых работ начались теоретические и экспериментальные исследования в области РСА и их воплощение в конкретные разработки [4, 28, 39\*, 99, 118, 192\*, 195, 196, 200\*, 209].

---

<sup>1</sup> В 1967 г. НИИ-17 переименован в МНИИП, а с 2003 г. – в ОАО «Концерн «Вега».

<sup>2</sup> Здесь и далее звездочкой отмечены публикации создателей радиолокаторов землеобзора в коллективе ОАО «Концерн «Вега» и непосредственных участников работ из смежных организаций.

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

История создания отечественной аппаратуры радиолокационного землеобзора – воздушной и космической радиолокационной разведки, решенные технические проблемы, а также вклад творческого коллектива, объединяющего специалистов ОАО «Концерн «Вега» и смежных организаций, подробно изложены в публикациях, посвященных 60-летию юбилею ОАО «Концерн «Вега» [39\*, 222\*].

Первой из работ была выполненная в 1961-1963 гг. фундаментальная НИР «Клинок» (научный руководитель П.О. Салганик), которая создала необходимый научно-технический задел для проведения опытно конструкторских разработок РСА. В НИР «Клинок» были проработаны вопросы теории РСА с оценкой влияния аппаратурных и траекторных нестабильностей на характеристики РСА, определены требования к входящим подсистемам и пути их реализации, впервые были предложены принципы построения и разработана теория РСА космического базирования. Были определены требования к составным частям РСА, исследованы пути их построения, разработаны действующие макеты основных блоков бортовой аппаратуры.

На созданной экспериментальной базе были изготовлены и испытаны самолетные макеты РСА трех диапазонов волн (2, 3 и 10 см), установленные на самолетах Ил-18 и Ли-2. С их помощью проведен большой объем летных исследований, позволивших обосновать параметры РСА в перспективных ОКР. Впервые в нашей стране были получены радиолокационные снимки местности и объектов с разрешением 10...15 м. Их сравнение с оптическими снимками выявило значительное превышение контрастов отображения объектов и элементов местности, особенно при работе в 10-см диапазоне волн.

В НИР «Клинок» и в последующих работах МНИИП по созданию самолетных и космических РСА большой вклад внесен специалистами ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ленинградской академии им. А.Ф. Можайского.

Особое внимание уделялось созданию высокопроизводительных оптических устройств синтеза радиолокационного изображения, основанных на подобию преобразований когерентных оптических сигналов (голограммы) с записанными вдоль траектории полета когерентными радиолокационными сигналами (радиоголограммами). Достижению высоких результатов способствовало привлечение к разработке этих устройств специалистов ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского под руководством Г.А. Кондратенкова и ГОИ им. С.И. Вавилова под руководством Ю.Н. Денисюка в части принципов оптической обработки сигналов РСА и реализации когерентной оптической системы.

Реализация и совершенствование отечественных средств радиолокационного землеобзора в последующие годы осуществлялась в следующих направлениях: разработка и введение в эксплуатацию аппаратуры воздушной радиолокационной разведки; проведение исследований по оценке и повышению информативности РСА, а также развитию методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); разработка и эксплуатация космических РБО и РСА.

Работы по созданию средств воздушной разведки, завершенные передачей в регулярную эксплуатацию, выполнялись в рамках ОКР «Булат», «Штык», «Сабля», «Шомпол» для самолетов Як-28БИ, Су-24МР, МиГ-25РБ, Ту-22М (руководители ра-

## Введение

бот А.Т. Метельский, Г.А. Зонненштраль, В.В. Вепринцев, Г.П. Володин, А.А. Кухтин), ОКР «Авиационная система наблюдения «Открытое небо» (РСА «Ронсар») и ОКР «Аннотация» по сертификации характеристик аппаратуры (руководители работ Л.Н. Тяпкин, В.Н. Шахгеданов), ОКР «ИМАРК» – многочастотный поляриметрический бортовой радиолокационный комплекс с цифровой адаптивной обработкой информации (руководители работ А.В. Дзенкевич, В.А. Плющев).

В ряде проведенных НИР «Экран-1» (научный руководитель Г.А. Зонненштраль), «Изгородь», «Силуэт» – восьмимиллиметрового РСА с разрешением 30 см (научный руководитель В.Б. Штейншлейгер) и др. намечены пути совершенствования самолетных РСА с улучшением разрешения от единиц метров до единиц дециметров. Параллельно проводились экспериментальные исследования, целями которых были подтверждение параметров разрабатываемых РСА и оценка информативности радиолокационного зондирования земной и морской поверхностей для решения широкого круга мониторинговых задач, изучения радиофизических свойств земной поверхности и объектов. Такие исследования с использованием РСА разных диапазонов волн, установленных на самолетах Як-28ИБ (3 см), Ту-124 (3 см и 2,5 м), Ил-18 (10 и 68 см), Ту-134А и Ан-26БРЛ «Арктика» (3, 23, 68 см и 2,5 м), проводились совместно с ИРЭ РАН. Следует также упомянуть эксперименты, проведенные в НИИП им. В.В. Тихомирова, Холдинге «Ленинец», НИИТП и в других организациях. Эти исследования позволили получить ценную информацию для практического применения материалов радиолокационного зондирования Земли.

Эпоха космической радиолокации наземных и надводных объектов открылась в 1971 г. запуском космического аппарата УС-А «Космос-402» с бортовым радиолокационным комплексом – активным сегментом системы морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ) [88\*, 545]. Идея создания космических аппаратов с радиолокаторами для наблюдения морской поверхности и контроля надводной обстановки была впервые сформулирована в 1959 г. выдающимся генеральным конструктором НПО машиностроения академиком В.Н. Челомеем. Общее научное руководство созданием системы МКРЦ осуществлял генеральный конструктор ЦНИИ «Комета» академик А.И. Савин. Разработанный в МНИИП бортовой комплекс (главный конструктор И.А. Бруханский) включал широкозахватный радиолокатор бокового обзора (РБО) «Риф», бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ) и линию передачи данных. Комплекс обеспечивал при работе в автоматическом режиме обнаружение и определение координат надводных кораблей. Для обеспечения высокого энергетического потенциала РБО электропитание на борту КА обеспечивала ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) «Бук».

Система МКРЦ с КА УС-А, УС-АМ была принята в 1975 г. и успешно функционировала (28 запусков) до 1988 г.

Линия космических РБО, обладающих грубым пространственным разрешением (~2 км), но хорошим радиометрическим разрешением (около 1 дБ) и широкой полосой захвата (до 500 км), была продолжена отечественной программой «Океан» (КА «Космос-1500», «Океан» и др.), сыгравшей важную роль в изучении Мирового океана и ледового покрова, а также при решении практических задач обеспечения судоходства в полярных широтах [197].



## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

Сложная судьба досталась отечественным космическим системам детальной радиолокационной разведки [49\*, 222\*, 552]. В 1966 г. в МНИИП была начата разработка орбитальной пилотируемой станции (ОПС) «Алмаз-А» с РСА «Меч-А» 10-см диапазона волн (главный конструктор П. О. Салганик). К марту 1978 г. летный комплект ОПС «Алмаз-А» был готов к запуску (ранее американского Seasat-A). Запуск был отменен. Была задана разработка РСА «Меч-К» для автоматического космического аппарата (КА) «Алмаз-Т», который был готов к запуску в 1982 г. После семи лет пребывания КА «Алмаз-Т» с РСА «Меч-К» на полигоне Байконур коллективом разработчиков космического аппарата и РСА удалось реализовать в 1987 г. запуск и успешную эксплуатацию в 1987–1989 гг. РСА «Меч-К» на спутнике «Космос-1870».

В реализацию и совершенствование отечественных космических РСА большой вклад внес ведущий специалист НПО машиностроения Е.А. Ксенофонтов. Наземная обработка информации с помощью машины оптического преобразования информации (МОПИ) обеспечивала получение радиолокационных снимков с разрешением 15...20 м

Усовершенствованный вариант РСА «Меч-КУ» с улучшенными характеристиками был успешно реализован в составе КА «Алмаз-1» в 1991–1992 гг. Был применен цифровой синтез радиолокационных изображений с помощью многопроцессорного вычислительного комплекса ПС-2000 с алгоритмами синтеза методом ускоренной прямой свертки с субапертурами [90\*, 157\*, 158\*] (ответственный за наземную обработку Л.Б. Неронский). Достигнутая разрешающая способность радиолокационных снимков составляла 10...15 м.

После завершения эксплуатации РСА «Меч-КУ» на КА «Алмаз-1» архив полученных радиограмм, обработанный с помощью вычислительного комплекса на базе универсальных ЭВМ в НПО машиностроения (ныне ОАО «ВПК «НПО машиностроения»), доступен для использования заинтересованными потребителями [538]. До настоящего времени информация, полученная с помощью РСА «Меч-КУ» является наивысшим отечественным достижением в области радиолокационного зондирования из космоса, а, учитывая используемый в РСА отличающийся от зарубежных РСА диапазон волн 10 см, она является уникальной и в мировом масштабе.

За истекшие годы в МНИИП (ОАО «Концерн «Вега») выполнен ряд НИР и этапов ОКР, направленных на повышение информативности космических РСА и формирование научно-технического задела для создания РСА, отвечающих современным требованиям. Начиная с 1990 г. работами по созданию систем землеобзора из космоса руководит И.Г. Осипов. За это время выполнены эскизные проекты многогорезимных многочастотных бортовых радиолокационных комплексов (БРЛК) ЭКОР-В (3, 10 и 68 см) для КА «Алмаз-1В» (главный конструктор БРЛК И.Г. Осипов), БРЛК Спинар-1ДМ (главный конструктор Ю.Н. Кулыба) с дециметровыми каналами (23 и 68 см) для трехчастотного БРЛК полезной нагрузки КА «Аркон-2», НИР «Арктика», «Корвет» (ответственный исполнитель В.Э. Турук) – широкозахватный РСА 3-см диапазона волн для ледовой разведки, использующий антенну с частотным сканированием по углу места, НИР «Карта» (исполнители В.Э. Турук, Л.Б. Неронский) с проработкой путей построения высокоорбитальных РСА, технические предложения по РСА «Смотр-Х» и «Смотр-Л» (исполнитель А.А. Липатов)

## Введение

---

для мониторинга объектов теплоэнергетического комплекса, а также НИР «Видеорешетка» (научный руководитель А.П. Курочкин) и НИР «Плеск-Вега» (научный руководитель Ю.Н. Кулыба), в которых прорабатывались перспективы создания сверхширокополосных видеоимпульсных РСА космического базирования.

Качественным скачком в развитии космических средств землеобзора является полномасштабная разработка РСА десятисантиметрового диапазона (главный конструктор И.Г. Осипов, с декабря 2004 г. – В.Э. Турук) для малого космического аппарата «Кондор-Э». При проектировании РСА предусматривалось создание универсальной многорежимной аппаратуры с сочетанием высокого пространственного разрешения (1...2 м), изобразительных и измерительных свойств получаемых снимков для решения широкого класса мониторинговых задач, а также контроля оперативной обстановки в зонах конфликтов. Его реализация в сочетании с действующей зарубежной и проектируемой отечественной аппаратурой, работающей в других диапазонах волн, существенно расширит информационные возможности глобальной системы дистанционного зондирования Земли, в том числе по районам Крайнего Севера и Антарктиды [45\*].

Исторически реализация и освоение космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА), которые, в принципе, могут обеспечить пространственное разрешение получаемых снимков до долей метра, можно характеризовать четырьмя этапами [55, 72, 125, 126, 215, 332, 454].

**Первый этап** – исследовательский, включающий запуск американских РСА Seasat-A (1978), SIR-A (1981), SIR-B (1982), работающих в 23-см диапазоне волн, отечественных РСА «Меч-К» и «Меч-КУ» космических аппаратов «Космос-1870» (1987-1989 гг.) и «Алмаз-1» (1991-1992 гг.), работающих в 10-см диапазоне волн, трехчастотного (диапазоны 3,1, 5,6 и 23 см) поляриметрического РСА SIR-C/X-SAR (1994) совместной разработки США, Германии. На этом этапе был накоплен большой экспериментальный материал, отработаны методы решения задач военной разведки, разработаны методики, а также программные пакеты для обработки и интерпретации получаемых радиолокационных изображений.

**Второй этап** – уточнение методик тематической обработки радиолокационных снимков и их применение для решения практических задач дистанционного зондирования Земли в разных сферах деятельности. С этой целью используется информация с европейских КА ERS-1 (1991-2000), ERS-2 (с 1995), канадского Radarsat-1 (с 1995), японского JERS-1 (1992-1998). Решение задач разведки сухопутных объектов и обеспечения военных операций «Буря в пустыне», война в Ираке реализуется системой военных спутников США Lacrosse (запуски в 1988, 1991, 1997, 2000, 2005) с разрешающей способностью до 0,6 м.

**Третий этап**, характеризующийся резким скачком в технологии радиолокационной съемки, включает запуск в 2000 г. интерферометрического РСА с жесткой базой SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) со съемкой 80 % земной суши для построения карт рельефа местности, эксплуатацию полнополяриметрических РСА Envisat-1 и PALSAR и широкое коммерческое использование космической радиолокационной информации, в том числе в интересах частных потребителей.

**Четвертый этап** характеризуется информационным взрывом в области космических радаров, который произошел в 2007 г., когда Германия, Италия, Китай,

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

Япония, Канада вывели на орбиты 9 спутников с бортовыми радарными [125]. Отмечается, что на протяжении 90-х годов спутники с бортовыми радарными с синтезированной апертурой запускали четыре страны с темпом один старт в 1,5–2 года. Пентагон использовал военные спутники Lacrosse для всепогодного слежения за советскими военными объектами на Севере и мобильными пусковыми установками МБР. Масштабы применения гражданских радарных спутников Канады, ESA и Японии в 90-х годах оставались довольно скромными из-за сравнительно высокой стоимости и недостаточной детальности радарных изображений, что ограничивало области их применения.

В начале нового века ситуация изменилась коренным образом. Современные технологии позволяют создавать спутниковые радиолокаторы с РСА, способные получать из космоса высокодетальные изображения объектов на Земле с пространственным разрешением менее 1 метра. Спецслужбы и оборонные структуры первыми оценили преимущества радиолокационной съемки из космоса. Сразу несколько стран – Япония, Китай, Германия, Италия, Израиль и Корея стали разрабатывать военные спутники с РСА метрового и субметрового разрешения. Появились аналогичные коммерческие проекты и программы двойного назначения.

Достигнутая высокая разрешающая способность космических РСА позволяет решать задачу радиовидения, имея преимущества перед съемкой в оптическом диапазоне не только во всепогодности, но и в возможности обнаружения и опознавания объектов наблюдения по радиолокационным контрастам, селекции движущихся наземных объектов [118, 194, 211].

Используется многочастотное поляриметрическое зондирование с измерением амплитудных и фазовых различий отраженных сигналов. Широко применяется интерферометрическая обработка данных радиолокационного зондирования для получения детальных трехмерных портретов объектов наблюдения, стационарных и движущихся, выявления изменений, вызванных природными, техногенными и антропогенными факторами.

Существенного повышения информативности систем радиолокационного наблюдения следует ожидать как от повышения пространственного разрешения космических РСА, так и от развития методов комплексной интерферометрической обработки данных разных частотных радиоканалов. Эти методы могут приблизить возможности распознавания типа объектов техники, идентификации и измерения физических параметров подстилающей поверхности (толщины пленок на морской поверхности, распределения влажности почвы и др.) к перспективным методам использования сверхширокополосных сигналов.

Примечательно, что как за рубежом, так и в России наблюдается серьезное продвижение в использовании методов обработки космической радиолокационной информации для решения практических задач землепользования, сельскохозяйственного и лесного мониторинга, экологии суши и морской поверхности, контроля районов рыбной ловли. Особо эффективны методы дифференциальной интерферометрии для выявления предвестников опасных явлений в окружающей обстановке: оползней, паводков, критических изменений геометрии природных и искусственных объектов и инженерных сооружений [364, 520].

## Введение

---

Широкий круг проблем, связанных с реализацией космических РСА и применением материалов радиолокационной съемки, широко освещается в журнальных публикациях (IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, «Исследования Земли из космоса», «Радиотехника», «Радиотехника и электроника», «Научные технологии» и др.) и трудах симпозиумов и конференций как зарубежных (EUSAR, IGARSS, RADAR, URSI), так и отечественных (НТОРЭС им. А.С. Попова, ИКИ РАН, ИПЭ РАН, Научного совета по космосу РАН и др.).

Из книжных публикаций последних лет следует отметить коллективную монографию «Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли» под редакцией А.И. Канащенкова, издательство Радиотехника, 2006 г. [17], в которой приведен подробный перечень задач, решаемых космическими РСА, рассмотрены вопросы распространения электромагнитного излучения в неоднородных средах, разработана иерархическая структура построения космической системы радиолокационного мониторинга. Следует отметить также выпущенные издательством ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского в 2008–2009 гг. учебники «Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений» под редакцией Л.А. Школьного [194] и «Теоретические основы построения радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли», авторы Кондратенков Г.А., Фролов А.Ю. [117]. Приведенные в них скрупулезное изложение классических принципов формирования синтезированной апертуры и математических преобразований сигнала, вопросов обнаружения целей можно с успехом использовать для изучения основ предмета с последующим учетом специфики космических РСА, изложенной в предлагаемой монографии.

Современное состояние аппаратного оснащения средствами дистанционного зондирования Земли, методологии их применения и реализуемого эффекта от их использования, а также баланса между затратами и окупаемостью еще далеки до насыщения. Прослеживается **ряд направлений развития этой области информационных технологий** с учетом потребностей гражданского и военного применений:

- широкое применение комплексных методов тематической обработки с использованием набора оптических, ИК и радиолокационных датчиков. Объединение (сближение) и стандартизация требований к аппаратуре военного и гражданского применения, мониторинга катастроф и чрезвычайных ситуаций;
- увеличение состава орбитальных группировок для уменьшения времени обновления информации преимущественно путем введения малогабаритных космических датчиков – РСА сантиметрового диапазона волн, где легче достигается субметровое пространственное разрешение, но значительно меньше возможностей для информации методами интерферометрии в связи с резкой зависимостью от погодных условий и состояний растительного покрова;
- непрерывное и регулярное использование действующих радиолокационных датчиков для проведения архивных съемок в фоновом режиме с ограничениями только по энергопотреблению и пропускной способности канала передачи данных. Это позволяет формировать банки радиолокационной информации для их использования в режимах выявления изменения в оперативной обстановке, повышения информативности материалов съемки – радиометрического

### ***Радиолокационные системы землеобзора космического базирования***

---

или пространственного разрешения или построения детальных карт рельефа местности;

- при проектировании новых радиолокационных датчиков предусматривается их многофункциональное использование, гибкое цифровое управление параметрами сигналов и режимами, возможности комплексирования активных (передающих) и пассивных (приемных) устройств в многопозиционные авиакосмические элементы глобальной информационной системы.

Учет перечисленных направлений реализуется в системном подходе к проектированию аппаратуры радиолокационного наблюдения, элементы которого прослеживаются по мере рассмотрения изложенных в монографии частных вопросов, связанных с созданием и применением радиолокационных систем землеобзора космического базирования.

---

## Глава 1

# РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЕОБЗОРА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ В ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

### 1.1. Структура глобальной системы аэрокосмического мониторинга

Развитие средств дистанционного зондирования Земли и околоземного пространства (атмосферы, ионосферы, магнитосферы, гравитационного поля), систем получения координатной информации (GPS, ГЛОНАСС), спутников-ретрансляторов на геостационарных орбитах, глобальных сетевых коммуникационных систем и информационных технологий привело к созданию глобальных систем аэрокосмического мониторинга. Обеспечивая оперативное слежение за земной и водной поверхностью и состоянием окружающей среды, системы аэрокосмического мониторинга позволяют решать задачи разведки, картографии, прогнозирования глобальных природных процессов, в том числе опасных, управления транспортными потоками, поиска полезных ископаемых, государственного и муниципального управления, научных исследований и т.п.

В зависимости от состава и принадлежности источников получения данных, содержания решаемых задач, организации распределения информации, а также ее применения, различают глобальные системы аэрокосмического мониторинга (Международные и национальные) гражданского и военного назначения. Общим для этих систем служит реализуемый в них *комплекс базовых функций*, основными из которых являются [184]:

- наблюдение поверхности Земли и околоземного пространства с использованием аппаратуры оптического, инфракрасного и радиодиапазонов, низко- и высокочастотных волновых комплексов, плазменных комплексов, комплексов мониторинга энергетических частиц, магнитометров, масс-анализаторов, спектрометров, градиентометров;
- сбор и регистрация на борту носителей средств наблюдения получаемой информации;
- передача с борта на наземные станции приема информации в режиме получения и с задержкой при ее накоплении данных в бортовом запоминающем устройстве;
- первичная обработка информации на наземных станциях приема и передача полученных данных в глобальные (Международные) и национальные центры управления различного назначения;
- сбор и обработка данных для решения задач глобального оперативного и краткосрочного прогноза процессов на земной поверхности или околоземного

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

пространства, а также ее хранение и отображение в глобальных (Международных) и национальных центрах управления различного назначения;

- обеспечение потребителей навигационной информацией, получаемой космическими навигационными системами, в интересах проведения мероприятий, связанных с перемещением необходимых ресурсов.

Наиболее полное решение задач оперативного слежения за земной поверхностью и состоянием окружающей среды обеспечивается *структурой глобальной системы аэрокосмического мониторинга*, развертываемой Федеральным космическим агентством России в интересах выявления предвестников стихийных бедствий, природных и техногенных катастроф [184].

Система включает в себя космический, авиационный и наземный сегменты (рис. 1.1).

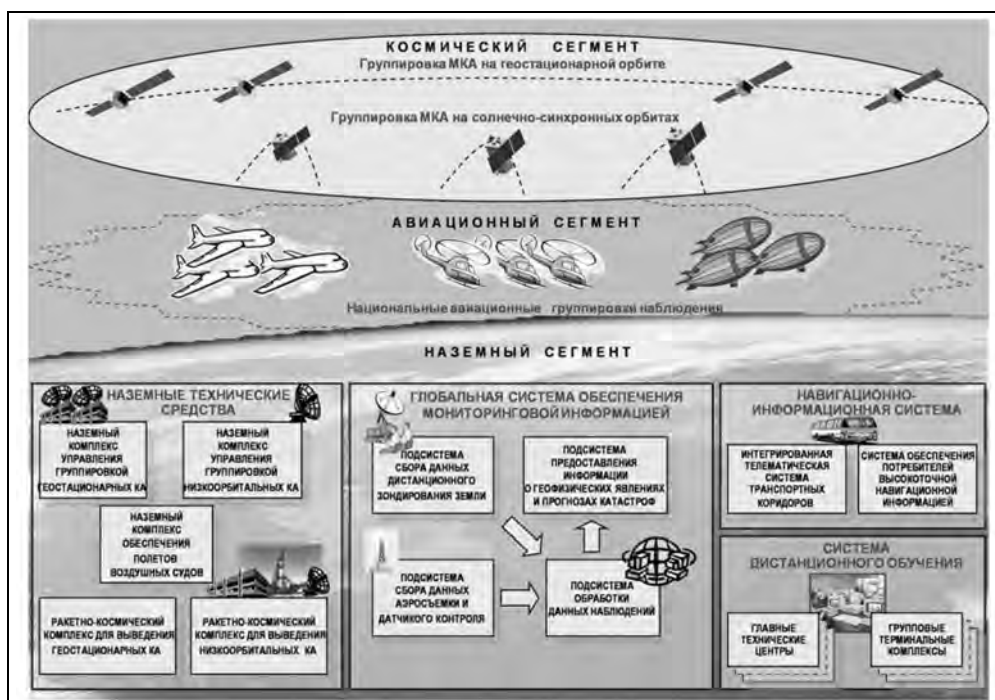


Рис. 1.1. Структура глобальной системы аэрокосмического мониторинга [184]

*Космический сегмент* включает орбитальную группировку, состоящую из космических аппаратов (КА), расположенных на разных орбитах (низких и геостационарных), функционально использует орбитальную группировку КА связи и ретрансляции, а также информацию глобальных навигационных систем ГЛОНАСС, GPS и Galileo.

Состав группировки КА определяется содержанием конкретных задач, решаемых системой. Например, для выявления признаков (предвестников) землетрясений группировка КА верхнего яруса должна включать в себя созвездие из шести

## Глава 1. РЛС землеобзора космического базирования в глобальной системе ...

спутников на геостационарной орбите (рис. 1.2), а группировка КА нижнего яруса – 3–4 спутника на солнечно-синхронных орбитах высотой 600...700 км с РСА.

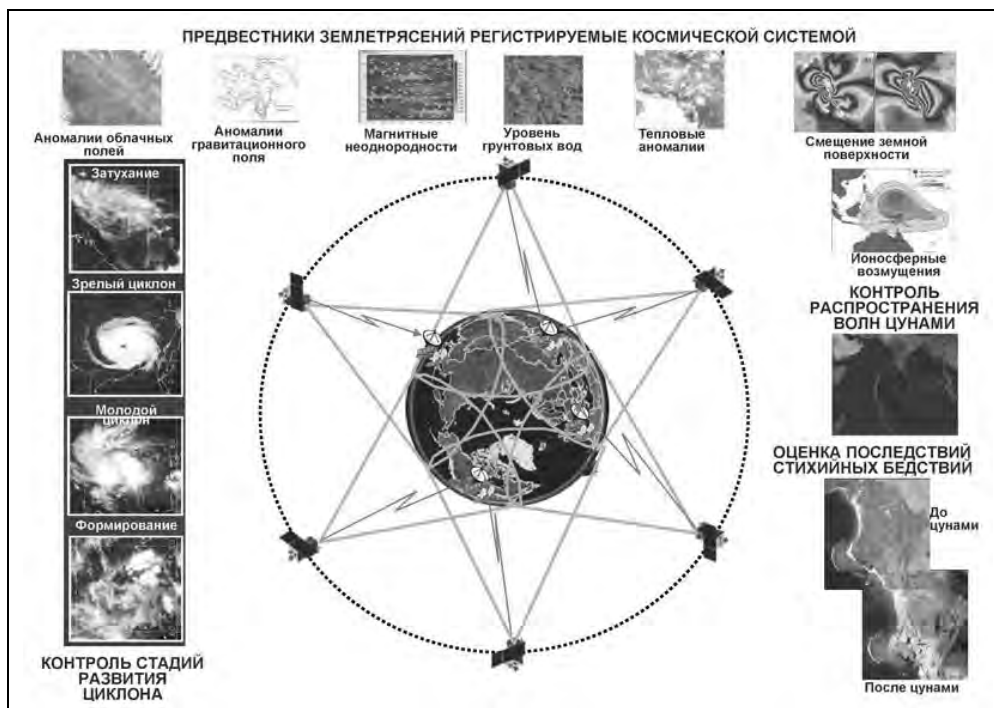


Рис. 1.2. Структура группировки КА глобальной системы аэрокосмического мониторинга, обеспечивающей решение задач прогноза землетрясений [184]

*Авиационный сегмент* – авиационные средства (самолеты, вертолеты, дирижабли, беспилотные авиационные комплексы). Авиационный сегмент системы предназначен для оперативного решения задач локального характера, не реализуемых возможностями космических средств [17, 33\*, 34\*, 36\*, 37\*, 41\*, 42\*, 44\*, 118, 184, 194].

*Наземный сегмент* системы включает наземные комплексы выведения и управления КА (ракетно-космические комплексы, наземный комплекс управления КА), наземный специальный комплекс.

*Наземный комплекс выведения КА* – ракетно-космические комплексы, развернутые на космодромах.

*Наземный комплекс управления* – центры управления полетом, стационарные наземные станции командно-измерительной системы с соответствующими средствами управления КА и связи, мобильные станции командно-измерительной системы и обмена информацией, систему связи и передачи данных.

Обеспечение потребителей мониторинговой информацией осуществляется средствами наземного специального комплекса, который включает навигационно-информационную систему и систему дистанционного обучения в области мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф.



## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

Эффективность системы глобального аэрокосмического мониторинга определяется возможностями применяемых средств наблюдения состояния поверхности Земли и околоземного пространства (в оптическом, инфракрасном, радио, низко- и высокочастотном диапазонах и т.д.), а также технологий обработки и распространения аэрокосмической информации.

В общей структуре информационной системы аэрокосмического мониторинга можно выделить два основных направления, различающиеся решаемыми задачами, источниками получения данных, организацией процесса распределения информации, а также ее применением:

1) национальный фрагмент *геоинформационной системы* (ГИС), решающей задачи гражданского применения, в том числе мониторинга катастроф;

2) национальные *информационные системы военного назначения* (ИСВН).

Данные для ГИС от оптоэлектронных, радиолокационных и других датчиков космического базирования распределяются на коммерческой основе (или по Международным соглашениям по мониторингу катастроф) через фирмы-дистрибьюторы.

Источником данных для ИСВН являются национальные средства землеобзора или данные, получаемые от других стран по договорам о Международном сотрудничестве (например, ЕС-НАТО), в том числе по совместной антитеррористической деятельности.

Наиболее информативные средства получения видовой информации – оптические и радиолокационные датчики, работающие в разных частях электромагнитного спектра. Благодаря различию свойств электромагнитных волн и принципов формирования изображений обеспечиваемая этими средствами информация взаимно дополняет друг друга.

В разделах 1.2–1.3 рассмотрено место радиолокационных систем землеобзора космического базирования как важнейшего сегмента глобальной аэрокосмической информационной системы двойного применения. Подробное описание аэрокосмической группировки дано в разделе 1.4.

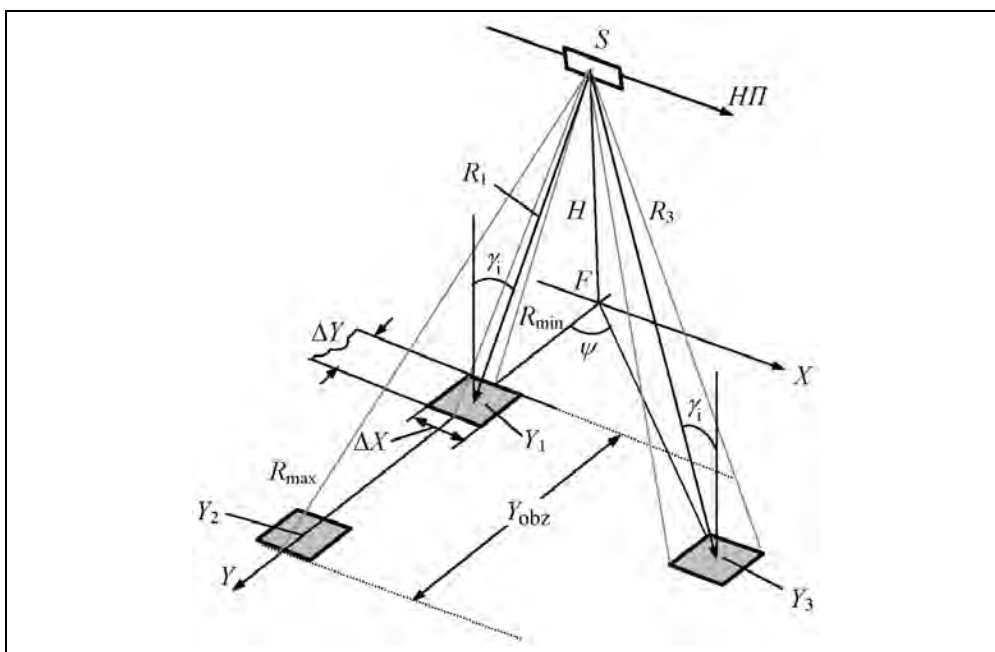
### **1.2. Информационные параметры радиолокационных систем землеобзора космического базирования**

Дадим определения основным информационным параметрам радиолокационных систем землеобзора космического базирования в сравнении их с параметрами оптоэлектронной аппаратуры, работающей в видимой части электромагнитного спектра. Рассмотрим особенности космической радиолокационной съемки в интересах гражданских и военных потребителей.

Радиолокационные системы являются *активными средствами наблюдения*, использующими облучение пространства зондирующим сигналом, прием и обработку отраженных сигналов и формирование выходных радиолокационных изображений (РЛИ), в которых представлена информация о разных свойствах объекта наблюдения, извлеченная из принятого сигнала, отраженного от облученного объекта или подстилающей поверхности. Кроме *моностатических (однопозиционных)*

радиолокационных датчиков, в которых передатчик и приемник размещены на одном КА, возможно *многопозиционное построение* радиолокационной системы (*бистатическое, мультистатическое*), когда передатчики и приемники размещаются на разных КА и образуют многодатчиковое информационное поле (технология ММО – Multi Input Multi Output [403]).

Геометрия радиолокационного обзора отличается от оптической съемки, при которой изображение строится в центральной угловой проекции относительно центра кадра – в перспективной проекции (аналогично РЛИ), а также в плановой проекции (при съемке в надир). При радиолокационном обзоре (моностатическом, см. рис. 1.3) основной режим работы системы – *боковой обзор – кадровая* или *маршрутная съемка*. РЛИ строится в координатах «*наклонная дальность – путевая дальность*», поэтому полоса съемки ( $\Delta Y$ ) или снимаемый кадр смещены относительно траектории следа КА (координата  $X$  на рисунке) вправо (*правосторонний обзор*) или влево (*левосторонний обзор*). Координату вдоль линии пути КА часто по аналогии с радиолокаторами кругового обзора называют *азимутом*.



**Рис. 1.3.** Геометрия радиолокационного обзора

Положение полосы (или кадра) радиолокационной съемки относительно следа КА можно перенацеливать произвольно в пределах *полосы обзора*  $Y_{obz}$  в одну или в две стороны. Перенацеливание позволяет уменьшить *время между повторными съемками* локальных районов на разных витках в промежутках между точным повторением орбиты. Тем самым повышается оперативность наблюдения заданных районов. Возможен *режим скошенного обзора*, в котором плоскость визирования

$SFY_3$  поворачивают на угол  $\psi$  относительно нормали к следу КА, а синтез РЛИ ведут, как и в режиме бокового обзора, предварительно скомпенсировав изменение дальности сигналов вдоль траектории полета относительно центра кадра съемки. Этот режим позволяет изменить ракурс наблюдения, провести съемку нескольких участков, расположенных на разном удалении от следа КА, а также увеличить время наблюдения заданного района с целью повышения разрешающей способности РЛИ (*прожекторный режим съемки РСА*).

Космические радиолокаторы землеобзора используют импульсный зондирующий сигнал, ширина спектра которого определяет *разрешение по наклонной дальности*  $\rho_R$ , а также *разрешение по горизонтальной дальности* на местности  $\rho_Y$  поперек линии пути, которое в режиме бокового обзора равно

$$\rho_Y = \frac{\rho_R}{\sin \gamma_i} = \frac{c}{2\Delta F} \frac{1}{\sin \gamma_i}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta F$  – ширина спектра зондирующего импульса;  $\gamma_i$  – угол падения, отсчитываемый от местной вертикали.

*Разрешение вдоль линии пути* зависит от типа радиолокатора и существенно отличается для случая некогерентного радиолокатора бокового обзора (РБО) или радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА). Аналогично оптическим датчикам разрешение определяется через отношение рабочей длины волны к длине апертуры антенны в РБО, а в РСА – к длине участка траектории движения платформы, на котором происходит когерентное запоминание принимаемого сигнала и последующий синтез искусственной апертуры (согласованная фильтрация траекторного сигнала).

Таким образом, для РБО при двойном учете диаграммы направленности антенны (ДНА) на передачу и прием разрешение вдоль линии пути (по азимуту), измеряемое по уровню половинной мощности принятого сигнала, определяется формулой

$$\rho_X = 0,64 \frac{R\lambda}{D_{xant}} \approx \frac{R\lambda}{D_{xant}}, \quad (1.2)$$

где  $D_{xant}$  – горизонтальный размер антенны радиолокатора (множитель 0,64 соответствует равномерному распределению поля по раскрытию антенны, а приближенное равенство – применению амплитудного взвешивания для уменьшения уровня боковых лепестков).

Для РСА форма ДНА реальной антенны радиолокатора мало влияет на разрешающую способность по азимуту. Она определяется длиной синтезированной апертуры, сформированной после приема сигналов,

$$\rho_X = 0,44 \frac{R\lambda}{L_a} \approx \frac{R\lambda}{2L_a}, \quad (1.3)$$

где  $L_a$  – длина синтезированной апертуры, которая может составлять десятки километров (множитель «2» учитывает двойной набег фазы при передаче и приеме сигналов от наблюдаемой местности; приближенное равенство учитывает амплитудное взвешивание при синтезе апертуры).

Реализуемая разрешающая способность современных средств радиолокационного землеобзора космического базирования (РСА) составляет от долей метра до сотен метров.

Возможность наблюдения отражающих радиоволны объектов или элементов местности характеризуется *чувствительностью* РСА. Она ограничена тепловыми шумами на входе приемника. Связь чувствительности с параметрами РСА определяется уравнением радиолокационной дальности, приведенным в разделе 3.4. Численно чувствительность РСА выражается через значение удельной отражающей способности (коэффициента отражения) подстилающей поверхности  $\sigma^0$ , мощность принимаемого сигнала от которой равна мощности тепловых шумов. По величине  $\sigma^0$  и площади элемента разрешения РСА для известной ЭПР цели можно вычислить отношение сигнал/шум или сигнал/шум+фон для оценки вероятности обнаружений целей на неотражающей поверхности или на отражающем фоне местности [35\*, 214].

*Радиометрическое разрешение* РСА (или *контрастно-яркостная чувствительность*) характеризует способность различать объекты с разной отражающей способностью (см. раздел 3.5). Она зависит от чувствительности РСА и площади наблюдаемого объекта.

Для космического радиолокационного землеобзора принципиально можно использовать часть электромагнитного спектра – *радиоволны*, которые с малыми потерями проходят через атмосферу. Их длина волны составляет от единиц сантиметров (частоты 10...18 ГГц) до единиц метров (частоты 200...400 МГц). Практически к началу XXI в. освоен частотный диапазон 1200...9500 МГц (длина волны соответственно от 23 до 3 см), в ближайшей перспективе ожидается расширение освоенного частотного диапазона до 400...14000 МГц (длина волны соответственно от 70 до 2 см).

*Электромагнитное излучение* характеризуется векторными свойствами – направлением вектора электрического поля или поляризацией. Обычно используют *линейную поляризацию* излучаемого сигнала – *вертикальную* или *горизонтальную*. При отражении электромагнитных волн от объектов сложной конфигурации происходит поворот плоскости поляризации. Используя прием параллельной (согласованной) и ортогональной (кроссполяризации) поляризаций и сравнение параметров отраженных сигналов в поляриметрических каналах можно существенно повысить информативность радиолокационного зондирования, особенно для идентификации земных покровов.

Получаемая радиолокационная информация в цифровом виде представляет собой *комплексные радиолокационные изображения* (КРЛИ), каждый элемент (пиксель) которых характеризуется *комплексным числом* – действительной и мнимой составляющими или *амплитудой* и *фазой*, численное значение которых определяет параметры сигнала, принятого от соответствующего элемента на земной поверхности. Современные радиолокаторы землеобзора являются измерительными приборами, позволяющими проводить инструментальную обработку получаемых данных о земной поверхности и расположенных на ней объектах.

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

Большие возможности заключены в *интерферометрической обработке пар фазовых изображений* (ФРЛИ). Это построение высокоточных карт рельефа, измерение малых (миллиметры и сантиметры) смещений земной коры и изменений геометрии инженерных сооружений (строительных конструкций, продуктопроводов), выявление изменений в оперативной обстановке за время между съемками (включая вскрытие несанкционированного доступа).

Возможности обнаружения и измерения параметров, слабо отражающих объектов и подстилающей поверхности на фоне тепловых шумов (шумы приемника) характеризуют *радиометрической чувствительностью* радиолокатора.

*Абсолютной и относительной погрешностями радиометрических измерений* определяют точность измерения отражающих свойств объектов наблюдения и подстилающей поверхности.

*Радиолокационная съемка обладает рядом преимуществ* и особенностей по сравнению с другими видовыми средствами наблюдения – оптическими, инфракрасными датчиками:

- независимость от метеорологических условий;
- независимость от условий освещенности;
- повышенная точность измерения геометрических характеристик объектов;
- возможность трехмерного портретирования объектов и построения карт рельефа местности;
- возможность выявления специфических характеристик объектов наблюдения, характеризующих их диэлектрические свойства, динамические характеристики, внутреннюю структуру;
- возможность наблюдения и обнаружения объектов, невидимых в оптическом или ИК-диапазонах электромагнитного спектра, скрытых снежным или растительным покровом, или по косвенным эффектам, например, по поверхностным проявлениям глубинных процессов в водной среде;
- возможность получения дополнительной информации об объектах по их электродинамическим свойствам (резонансу, поляриметрическим характеристикам, отражательным, проникающим или поглощающим свойствам в зависимости от длины радиоволн).

Исторически сложилось, что первые радиолокаторы бокового обзора с реальной антенной (РБО) и с синтезированной апертурой антенны (РСА) авиационного базирования предназначались для видовой разведки при сопровождении боевых операций [101, 292, 477, 553]. Первые космические РБО входили в состав системы морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ), находившейся на вооружении ВМФ СССР (28 КА с 1975 по 1985 г. [88\*, 222\*, 545]). Космические РБО гражданского применения серии «Космос-1500», «Океан» обеспечивали получение информации в интересах гидрометеорологии, океанологии, изучения ледового покрова и материковых льдов, а также контроля ледовой обстановки для гражданских потребителей и служб ВМФ СССР [197].

Первый космический радиолокатор с синтезированной апертурой Seasat-A, запущенный США в 1978 г., а также РСА SIR-A, SIR-B в составе многоцветного

транспортного космического корабля (МТКК) Шаттл (1994 и 1995 гг.) работали в 23 см диапазоне волн и имели разрешающую способность радиолокационных изображений (РЛИ) около 30 м. Полученные с их помощью изображения морской поверхности и суши показали применимость космической радиолокационной съемки для решения широкого круга задач мониторинга природных объектов.

В СССР космические РСА «Меч-А» для орбитальной пилотируемой станции «Алмаз-А» (готовность к запуску – в 1978 г. [563]) и РСА «Меч-К» в составе автоматического КА «Алмаз-Т», реализованный в 1987-1989 гг. («Космос-1870»), хотя и имели близкую к зарубежным РСА разрешающую способность снимков около 20 м, проектировались как системы всепогодной видовой разведки. В них были предусмотрены перенацеливание зоны захвата в пределах широкой полосы обзора и двусторонний обзор. Эти возможности значительно повышали оперативность наблюдения (уменьшали период между повторными съемками) и являлись важнейшей характеристикой систем военного назначения. В усовершенствованном РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1» кроме улучшения разрешающей способности до 10...15 м была реализована передача информации через спутник-ретранслятор на пункт приема, где обеспечивался цифровой синтез РЛИ с использованием высокопроизводительного цифрового вычислительного комплекса. Это резко сократило задержку между моментом съемки и доставкой информации потребителям.

Большой объем экспериментов по поляриметрическому зондированию земных покровов в диапазонах волн 3, 5,6 и 23 см был проведен в США. В них участвовали трехчастотный космический РСА SIR-C/X-SAR, четырехчастотный самолетный РСА AIRSAR (дополненный РСА 70-см диапазона), а также РСА «Меч-К» КА «Космос-1870» в 10-см диапазоне волн. Систематизированные данные измерений отражающей способности подстилающей поверхности в разных диапазонах волн, поляризации и углах падения составили основу для разработки *инструментальных методов обработки радиолокационной информации* и проектирования систем радиолокационного наблюдения гражданского и военного применения [474, 522].

Заложенные в РСА SIR-C/X-SAR параметры: полоса сигнала 40 МГц, обеспечивающая пространственное разрешение РЛИ около 4 м, полоса обзора 300 км позволяли получать РЛИ, пригодные для решения задач *военной разведки*, в частности, для формирования базы радиолокационных данных с целью оценки изменений обстановки на объектах наблюдения. В связи с ограниченным временем полета МТКК Шаттл (до 7–8 суток) полученные данные могли сопоставляться с материалами съемок другими датчиками. Хотя указанные возможности не нашли упоминания в открытой литературе, можно рассматривать бортовой комплекс SIR-C/X-SAR как *средство радиолокационного наблюдения (РЛН) двойного применения*.

Уникальным событием было создание на базе SIR-C/X-SAR двухчастотного интерферометра SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с приемной антенной, установленной на 60-метровой выдвижной штанге [521]. Построенные по материалам съемок карты рельефа земной поверхности (с погрешностью около 4 м) применяются для обновления топографических карт, а также для составления опорных материалов для управления точным оружием. Таким образом, применение этой аппаратуры, как и методов получения карт рельефа с «мягкой базой» тандемами РСА

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

TerraSAR-X и Radarsat-1/2/3 [276, 317, 371, 372], являются *технологиями двойного применения*.

Первыми зарубежными РСА *военного назначения* были оснащены разработанные в США космические аппараты типа «Лакросс» (5 аппаратов), которые были выведены на орбиту с 1991 по 2005 гг. [126]. Входящий в состав КА бортовой РСА детальной радиолокационной разведки имеет разрешающую способность около 0,6 м. Эти КА, функционирующие до настоящего времени, обеспечивали информационное сопровождение военных операций США в Персидском заливе, Афганистане, Югославии, Ираке и других горячих точках.

В настоящее время (к 2010 г.) в США находятся в эксплуатации три спутника «Лакросс» серии Vega и Опух. В орбитальной группировке предусмотрено 2–4 КА «Лакросс», три КА-ретранслятора SDS и 3–4 КА-ретранслятора TRDS. РСА в составе КА обеспечивает получение изображений земной поверхности с глобальным охватом, включая просмотр полярных районов Земли. Результаты наблюдения передаются по радиоканалам в реальном масштабе времени в Центр сбора и обработки информации. Возможна разведка территории России двумя КА при полосе обзора 4000 км – более 9 ч/сут и тремя КА – более 14 ч/сут.

Из космических РСА с высокой разрешающей способностью, выведенных на орбиту в 2007–2008 гг., только SAR Lure названы как РСА *военного назначения*, остальные, несомненно, являются информационными *системами двойного применения*.

По требованиям, предъявляемым к современной аппаратуре дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), различия *гражданских* и *военных космических систем* касаются, в основном, требований к оперативности получения и доставки потребителю получаемой информации. Эти вопросы при современном состоянии техники определяются составом орбитальной группировки, пропускной способностью радиолинии передачи информации и организацией способов передачи данных потребителю. Важными характеристиками являются производительность программно-аппаратных средств синтеза РЛИ и его тематической обработки, включая внедрение методов автоматизации вторичной обработки, сегментации, обнаружения изменений в оперативной обстановке, индикации движущихся целей, распознавания класса и типа целей.

Отличия аппаратуры РСА военного назначения от гражданских коммерческих систем могут также касаться расширенных режимов военного времени за пределами ограничений, предусмотренных Регламентом радиосвязи [210\*, 199, 217]. В военных системах должны предусматриваться средства защиты от преднамеренных помех. Применение криптографической защиты получаемых данных актуально для аппаратуры обоих назначений в связи с высокой стоимостью информационных продуктов.

Преимущества космической радиолокационной разведки для решения военных задач заключаются в возможности регулярного круглосуточного обновления информации в глобальных масштабах по районам предполагаемых конфликтов без проникновения на территории чужих стран. Это обеспечивает раннее выявление фактов подготовки к военным или террористическим действиям. Использование радиолокационных средств разведки резко повышает эффективность боевых операций, обеспечивая их проведение в ночное время.

Недостатками космических средств радиолокационной видовой разведки являются малая длительность контакта (для низкоорбитальных средств – секунды в маршрутном или прожекторном режимах, единицы минут – в режиме скошенного обзора) с большими интервалами повторной съемки, а также опасность подавления РСА путем создания мощной помехи по главному лепестку диаграммы направленности антенны РСА с территории контролируемого района.

Для повышения оперативности наблюдения требуется увеличение состава орбитальной группировки. Альтернативой является комплексирование аэрокосмических средств видовой разведки. Особые перспективы имеют бистатические (многопозиционные) средства аэрокосмического радиолокационного наблюдения с подсветом от КА на эллиптической или геостационарной орбите и применением легких пассивных приемных датчиков на беспилотных летательных аппаратах (БЛА) или микроспутниках. Скрытность работы пассивных датчиков обеспечит помехозащищенность системы наблюдения, а комплексирование со средствами радиотехнической разведки позволит определить точные координаты станций помех для их уничтожения в ходе боевой операции.

Приведенные доводы говорят о необходимости построения комплексной аэрокосмической информационной системы, включающей датчики видовой разведки, систему передачи, обработки и распределения информации. Космический сегмент такой информационной системы в его взаимосвязи с другими обеспечивающими подсистемами является предметом рассмотрения в настоящей монографии.

В разделе 1.3 дана иллюстрация информационного обеспечения военных операций США и НАТО по опубликованным материалам («Независимое военное обозрение», «Новости космонавтики» и др.). Эти операции проводились, в основном, летом и в районах, расположенных в низких широтах, с благоприятными метеорологическими условиями. Поэтому большое значение в информационном обеспечении имели оптические датчики, роль которых в других условиях гораздо меньше.

### **1.3. Применение космических систем радиолокационного наблюдения для видовой разведки при информационном сопровождении военных операций**

#### **Операции США и НАТО против Ирака**

Рассмотрим опыт информационного обеспечения боевых действий на примере операций США и НАТО в Ираке, Югославии и Афганистане.

Последние два десятилетия характеризуются вооруженным вмешательством США и стран НАТО в Ирак. Это операции «Буря в пустыне» 1991 г., «Лиса в пустыне» 1998 г. и «Свобода Ираку» 2003 г. Если рассматривать военный аспект этих операций, то война в Персидском заливе 1991 г., операция «Буря в пустыне», открыли эру войн высоких технологий [27, 201, 202]. Многонациональными силами (МНС) антииракской коалиции была развернута мощная авиационная группировка, включающая ударные тактические самолеты, оснащенные высокоточным оружием и оборудованные индивидуальными станциями активных и пассивных помех,



## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

стратегические и тактические самолеты-разведчики, самолеты радиоэлектронной борьбы. Применялись специальные самолеты для уничтожения радиоэлектронных средств управления войсками.

МНС имели абсолютное превосходство по стратегическим самолетам, космическим средствам навигации и связи, высокоточному управляемому оружию класса «воздух–поверхность», «корабль–поверхность» (крылатые ракеты). Контроль воздушного пространства и управление авиацией обеспечивали самолеты дальнего радиолокационного обнаружения и управления Е-3 АВАКС, Е-2С «Хокай», а также радиолокационная система воздушной разведки наземных целей и управления нанесением ударов Е-8 «Джистарс».

Характерные особенности операции «Буря в пустыне» – сопровождение массированных ударов авиации самой крупной в истории радиоэлектронной войной; нанесение массированных ударов преимущественно ночью; применение глобальной спутниковой навигационной системы «Навстар». Одной из задач, которые, несомненно, ставились в ходе этих операций, было проведение испытаний ракетного вооружения различного базирования в боевых условиях в интересах его дальнейшего развития.

К проведению операции «Лиса в пустыне» командование вооруженных сил США и Великобритании тщательно подготовились, используя возможность свободного ведения воздушной и космической разведки территории Ирака в ходе контроля произвольно провозглашенных Вашингтоном и Лондоном «бесполетных зон».

Разведывательное обеспечение боевых действий сил союзников осуществлялось постоянно действующей системой наземных, космических, авиационных и корабельных средств разведки и наблюдения. Основу разведывательного обеспечения, особенно при оценке результатов нанесенных ударов, составляла действующая орбитальная группировка, включающая три КА оптоэлектронной разведки КН-11 и два КА радиолокационной разведки «Лакросс». Вся орбитальная группировка функционировала на орбитах до начала боевых действий, потребовалось только осуществить координатный маневр двух КА системы КН-11 с тем, чтобы увеличить время контроля обстановки на территории Ирака. Используя системы космической разведки обеспечивали ведение оптоэлектронной разведки с периодичностью (в среднем) 2...3 ч/сут, радиолокационной разведки 2...2,5 ч с суммарным ежесуточным контролем территории Ирака порядка 160...190 мин.

Несмотря на небольшую продолжительность и масштабы, операция «Лиса в пустыне» имела свои особенности по сравнению с операцией «Буря в пустыне». В воздушной наступательной операции имелись следующие тенденции: увеличение количества беспилотных летательных средств (соотношение пусков крылатых ракет к самолетовылетам 1:1,3 против 1:10), увеличение количественного состава крылатых ракет, особенно морского базирования. В ходе всей операции постоянно привлекались самолеты ДРЛО и управления Е-3 системы АВАКС, самолеты разведки наземных целей и управления нанесением ударов Е-8 «Джистарс», воздушный пункт управления ЕС-130 «Геркулес» и самолеты-разведчики RC-135 и U-2, а также вертолеты поисково-спасательного обеспечения.

*Операция «Лиса в пустыне»* подтвердила:

- наибольшая угроза воздушного нападения будет исходить непосредственно с моря или с приморских направлений;
- главным средством боевого воздействия будет являться высокоточное оружие;
- наиболее предпочтительным временем для нанесения первых ракетно-авиационных ударов является темное время суток;
- успеху операции во многом способствует комплексное применение сил и средств разведки, включающих космическую, воздушную, наземную и морскую разведки, до начала и в ходе операции.

При операции США и НАТО «Свобода Ираку» в 2003 г. значительное влияние оказали уроки, полученные США и их союзниками в первой иракской войне, в войне на Балканах и в антитеррористической операции в Афганистане. Как и в 1991 г., союзники создали мощную группировку сил и средств, в том числе и воздушного нападения. Для скорейшего достижения целей «молниеносной» войны с учетом прежнего опыта применения высокоточного оружия (ВТО), воздушные удары наносились в основном с применением крылатых ракет морского («Томагавк») и воздушного (AGM-86) базирования, а также высокоточных авиационных бомб. Роль ВТО резко возросла. Так, если в операции «Буря в пустыне» его доля не превышала 10 %, то в операции «Свобода для Ирака» доля ВТО составила не менее 80 % от общего числа использованных боеприпасов.

Одной из больших проблем для командования коалиции стала организация взаимодействия между ВВС и наземными войсками с целью обеспечения взаимной безопасности (потери от применения своих ракет). По мнению специалистов одной из главных причин введения неверных координат перед пуском ракеты или бомбы была неспособность ВВС США вести обмен данными в режиме реального времени с союзными силами на уровне отделения.

Большое значение в организации взаимодействия имело создание интегральной системы сбора информации с использованием самолетов ДРЛО E-3 АВАКС, E-8 «Джистарс», разведывательных RC-135 «Ривет Джойнт» и U-2, а также БЛА «Предейтор». Совокупность поступающих от них данных давала точную картину действий противоборствующих сторон на поле боя. Обработанная информация оперативно передавалась боевым патрульным самолетам, которые успевали поразить цель до нанесения ею удара.

Во время первой войны с Ираком американские вооруженные силы использовали 16 военных, и пять коммерческих спутников, которые позволяли передавать информацию в объеме 200 млн. бит/с [20, 65]. При операции в Косово ее объемы выросли почти вдвое, в Афганистане (2001–2002 гг.) объем передаваемых данных достиг почти 1 млрд. бит/с. В 2003 г. во время вторжения в Ирак войска США уже обладали возможностью передавать 2,4 Гбит/с. Большая часть этого объема передавалась через коммерческие спутники.

В целом Ирак в очередной раз стал испытательным полигоном для проверки новых американских концепций ведения войны, в частности, так называемой «доктрины Рамсфелда», или «цифровой войны», со ставкой на обеспечение господства в воздухе, тесное межвидовое взаимодействие, широкое применение высокоточно-

го оружия и компьютерных технологий, активные действия небольших мобильных войсковых формирований. При этом некоторые эксперты в США полагают, что речь идет о коренном пересмотре характера современной войны — новом этапе революции в военном деле.

### **Военная операция против Югославии**

Операция «Решительная сила» против Югославии началась 24 марта 1999 г. проведением воздушной наступательной операции авиационной группировки НАТО. Она продолжалась до 27 марта. Кампания НАТО против Югославии характеризуется беспрецедентными масштабами использования военных и гражданских спутников. Свыше 50 спутников США и европейских стран, изначально предназначавшихся для использования против стран Варшавского договора, были непосредственно задействованы НАТО в операциях по координации действий авиации, осуществлению разведки и обеспечению боевых действий. По меньшей мере, от 15 до 20 американских и европейских КА были использованы при планировании и осуществлении налетов.

В войне в Югославии применялся комплекс космических разведывательных средств, включая два спутника радиолокационной разведки «Лакросс», три усовершенствованных спутника оптоэлектронной разведки типа КН-11, а также три более легких спутника Национального бюро аэрофотосъемки. По признанию самих американцев в этом конфликте спутники должны были решать в основном тактические задачи – отслеживать, куда направляются военные автоколонны, и быстро передавать информацию на базы ВВС. При этом выяснилось, что задержка доставки информации до исполнителя – оператора бомбометания самолета – была велика, что приводило к низкой эффективности бомбовых ударов по мобильным объектам – танковым колоннам, скоплениям войск.

Применение спутников радиолокационной разведки «Лакросс» имело целью разведку до и после нанесения бомбовых ударов по целям в лесных массивах, которые могли укрывать скопление войск и военной техники. Для обработки и передачи командованию НАТО огромных потоков космической информации было сформировано специальное Управление тактической разведки, куда вошли представители нескольких разведывательных структур США. Это Управление обеспечивало выбор целей и оперативную передачу разведывательных изображений командованию и летным экипажам, принимавшим участие в авиаударах.

### **Операция США в Афганистане**

Американскими военными экспертами дана предварительная оценка использования космической группировки США в ходе антитеррористической операции «Несокрушимая свобода» в Афганистане. Отмечается существенный вклад спутниковых систем в решение разведывательных, коммуникационных, радионавигационных и метеорологических задач [235].

Космические разведывательные системы применялись в целях обеспечения американских войск своевременными и достоверными данными о группировке сил Исламского движения талибов, замысле действий противника, его боеспособности

и готовности к нанесению ударов, а также для добывания сведений об особенностях местности.

Космические системы оптоэлектронной и радиолокационной разведки были задействованы в полном объеме. В их состав входило шесть ИСЗ (три ИСЗ оптоэлектронной разведки типа КН-11 и три ИСЗ радиолокационной разведки типа «Лакросс»). Они обеспечивали получение изображений различных объектов, образцов вооружений и военной техники, наблюдение за дислокацией группировки войск Исламского движения талибов и в целом за ведением боевых действий в Афганистане. Спутники разведки вели съемку с максимальным разрешением и использовались совместно с ИСЗ-ретрансляторами типов SDS и TDRS. Кроме того, для обеспечения функционирования КА типа КН-11 задействовались ИСЗ метеорологической системы.

В целях расширения возможностей видовой разведки по обеспечению боевых действий национальное управление видовой разведки и картографии еще в октябре 2001 года приобрело эксклюзивное право на использование снимков территории Афганистана, сделанных коммерческим аппаратом «Айконэс-2», обладающим максимальной разрешающей способностью порядка 1 м.

Вооруженными силами США также активно использовались данные, получаемые спутниками системы разведки природных ресурсов Земли «Лэндсат-7», «Терра», «Орбвью-2». Это расширило возможности по составлению, обновлению и своевременному уточнению карт местности, облегчило проведение инженерной оценки зоны боевых действий. Высокая эффективность такой системы была доказана в Афганистане при передаче в режиме реального времени изображения с БЛА «Предейтор» на самолет АС-130 в ходе поисков боевиков «Аль-Каиды». Оснащенный ракетой «Хеллфайр» БЛА после обнаружения цели получил команду Центрального командования США во Флориде и уничтожил ее через несколько минут.

Для решения проблемы взаимодействия также использовались компьютерные системы обработки и передачи данных, позволяющие значительно улучшить владение обстановкой на поле боя. При их применении данные системы ДРЛО Е-3 АВАКС и объединенной системы радиолокационного наблюдения и целеуказания ударным средствам Е-8С «Джистарс» собирались воедино, обрабатывались и передавались заинтересованным штабам.

Военные спутниковые системы связи работали с максимальным напряжением, однако смогли обеспечить лишь 40...60 % потребности участников операции «Несокрушимая свобода». В состав спутниковой группировки вошли шесть спутников стратегической системы связи DSCS, три спутника объединенной стратегической и тактической связи «Милстар», два ИСЗ типа UFO оперативно-тактической системы связи ВМС, ВВС и сухопутных войск и шесть спутников системы передачи данных SDS. Кроме того, традиционно использовались ИСЗ принадлежащей НАСА системы слежения и ретрансляции данных TDRSS. Вместе с тем резко возросшие потоки данных (по сравнению с операцией «Буря в пустыне» объемы передаваемой информации возросли примерно в семь раз), необходимых для обеспечения проводимой операции, потребовали активного привлечения коммерческих систем связи.

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

Предварительный анализ показал, что спутниковые системы США использовались с максимальной отдачей и во многом обеспечили успешное проведение контртеррористической операции. Вместе с тем отмечается ряд недостатков, в том числе отсутствие радиолокационных и оптоэлектронных разведывательных систем, ориентированных на потребителя тактического звена, что в ряде случаев привело к несвоевременному получению пользователями разведывательных данных. Кроме того, недостаточная периодичность наблюдения района ведения боевых действий не позволила в полном объеме проконтролировать перемещение сил и средств талибов.

Как отмечено в докладе на конференции Military Radar'2006 [492], основная тенденция современного развития космических систем радиолокационного наблюдения состоит в создании систем двойного применения с использованием единых технологий, стандартов, программного обеспечения обработки данных и т.д. Это тем более оправдано, что требуемые технические характеристики радиолокационных датчиков, во многом определяемые ограничениями Регламента радиосвязи или уровнем развития элементной базы и технологий, практически совпадают.

**Важными аспектами интеграции информационных средств**, включающих системы военного и двойного применения, являются:

- выбор стандартов (есть риск выбрать неоптимальный стандарт, нужен тщательный анализ развития гражданских стандартов);
- адаптация аппаратуры и программного обеспечения к выбранным стандартам;
- тестирование данных для оценки заданных характеристик технических средств, имеющих ограничений, а также потенциальных резервов для их улучшения применительно к конкретным задачам (экспериментальные «недокументированные» режимы);
- «обратная совместимость» гражданских стандартов на прошлые версии продуктов;
- технологические запасы для обеспечения надежности работы системы;
- воспроизводимость получаемых продуктов;
- разработка стратегии взаимосвязей критических технологий для сохранения жизненного цикла при частичном старении.

Основными средствами информационно-разведывательного обеспечения для применения высокоточного оружия (ВТО) в США являются космические и, в более ограниченном объеме, авиационные *системы видовой разведки*. Группировка космической видовой разведки США включает в себя спутники оптоэлектронной и радиолокационной разведки, спутники-ретрансляторы и развитую высокопроизводительную наземную инфраструктуру. Данная группировка позволяет с высокой точностью вскрывать оперативное построение войск противника, состав сил и средств, в том числе элементы системы боевого управления, а также определять координаты наиболее важных объектов.

Общее развитие разведывательных космических систем США осуществляется в направлении обеспечения глобального, всепогодного, непрерывного контроля деятельности вооруженных сил вероятного противника с возможностью непосред-

ственной передачи данных различным органам военного управления. Во многом это достигается за счет объединения всех сил и средств в сетевые системы [34\*, 36\*, 40\*, 46\*, 48\*].

*Сетецентрическими системами* называются комплексы, объединенные между собой при помощи вычислительных сетей и взаимодействующие в едином информационном пространстве. Применение такого подхода обеспечивает качественные улучшения по скорости и точности получения обобщенной информации об интересующих объектах на поверхности Земли.

Министерство обороны США планирует также интегрировать в космическую систему сбора видовой информации, существующие и перспективные коммерческие спутники съемки земной поверхности с высоким разрешением (около 1 м). Кроме того, планируется продолжить создание единой глобальной географической информационной системы (ГИС), содержащей детальные цифровые карты всей поверхности Земли для обеспечения нацеливания ударных средств. В частности, в последние годы к решению задач информационного обеспечения для управления высокоточным оружием в дополнение к орбитальной группировке привлекаются малоразмерные спутники (малые – массой до 1 т и миниспутники – массой 100...500 кг).

Накопление информации о земной поверхности в мирное время имеет ярко выраженное двойное назначение. С одной стороны выполняется мониторинг Земли с целью выявления и предупреждения природных катаклизмов, с другой – происходит сбор информации и картографирование с возможностью использования накопленных данных в дальнейшем, в военное время. Наличие таких заранее собранных и обработанных данных становится особенно важным в военное время, когда спутниковые системы навигации и разведки будут выведены из строя или заблокированы. Применение ВТО в таких условиях потребует знания рельефа местности и координат расположения объектов, по которым может быть осуществлена привязка.

Анализ опыта последних локальных конфликтов выявил не только необходимость ведения непрерывной разведки и постоянного наблюдения за районом боевых действий в условиях быстро меняющейся оперативной обстановки, но и доставки обработанной информации в кратчайшие сроки непосредственно на носители высокоточного оружия.

Успешным действиям американских войск в локальных вооруженных конфликтах способствовало безусловное технологическое превосходство систем вооружения и боевого обеспечения войск и обладание достаточно полной развединформацией об оперативной обстановке в районах боевых действий, а также целенаправленность и согласованность боевых действий. За эти десять лет значительно укрепились позиции сторонников концепции «объединенности» вооруженных сил, предполагающей максимальное использование боевых возможностей всех их видов (включая привлечение гражданских систем) для достижения конечных целей войны. По мере набора опыта проведения военных операций в США были разработаны основополагающие документы – «Единая перспектива-2010» и «Единая перспектива-2020», а также планы реализации выдвигаемых в них требований. Предложенная американская концепция «Сетецентрической войны» обосновывала необходимость реформирования вооруженных сил.

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

**Современная военная доктрина США** охватывает следующие области:

- обеспечение деятельности в космосе;
- боевое и техническое обеспечение из космоса боевых действий вооруженных сил;
- ведение непрерывного контроля и управление ситуацией с помощью космических средств;
- применение силы в космосе и из космоса.

Политическое руководство США обязывает МО организовывать интегрированную систему управления спутниковыми системами, скоординированную с другими ведомствами. Особой задачей является достижение информационного превосходства, реализация принципа стратегического сдерживания, повышение эффективности вооруженных сил государства в целом, расширение выгодного для США Международного сотрудничества в военной и других сферах.

**При создании космических систем военного назначения (КСВН)** в США основное внимание уделяют следующим направлениям [216]:

- поддержание в состоянии боевой готовности существующих систем и развертывание новых;
- расширение возможностей бортовой аппаратуры КА;
- повышение оперативности доставки информации со спутников;
- увеличение времени активного существования КА;
- размещение на одном КА аппаратуры для решения двух и более задач;
- создание новых ракет-носителей одноразового и многоразового применения;
- совершенствование наземных средств управления КСВН;
- объединение результатов всех видов разведки;
- разработка КА для противокосмической и противоракетной обороны.

Американские ведомства – Агентство перспективных оборонных исследований (DARPA), Военно-воздушные силы и Национальное разведывательное управление (NRO) – изучают возможность создания системы глобального радиолокационного наблюдения, которая могла бы обеспечивать прямое и оперативное получение информации войсковыми командирами без посредничества центральных разведывательных органов.

Такая система должна будет состоять из 24–48 относительно небольших аппаратов, оснащенных радиолокаторами. По замыслу, войсковые подразделения, действующие в кризисных регионах, будут в состоянии непосредственно выдавать задания спутникам на получение изображений заданных районов и получать информацию в течение 15 мин.

Предполагается также, что эта система будет функционировать во взаимодействии со спутниковой системой предупреждения о ракетном нападении, что позволит решить проблему обнаружения мобильных пусковых установок баллистических ракет.

Главным из этих требований является всемерное укрепление единства вооруженных сил. Всем командирам предписывается стремиться к тому, чтобы на основе использования передовых информационных технологий, объединенные группировки американских вооруженных сил непременно достигли подавляющего превосходства

над противником не в какой-то одной, а во всех сферах вооруженного противоборства: в воздухе, на суше и море, в космосе и информационном пространстве.

Разработанная концепция признает, что последовательное или независимое параллельное применение различных элементов военной мощи США нецелесообразно. Наоборот, подчеркивается, что максимальная интеграция их возможностей, тесное и грамотное взаимодействие многократно увеличивают боевой потенциал военной группировки и служат основой общей победы над противником. Эти положения были реализованы на практике в ходе военной операции США и их союзников против Ирака, они отличаются высоким уровнем взаимодействия видов и родов войск (сил), применением всех видов маневра войсками и средств поражения, дальнейшим развитием форм и способов ведения боевых действий.

Военное руководство США, достаточно осторожно оценивая роль авиации в этой операции, все же признает, что в 2003 г. авиация применялась значительно эффективней, чем 12 лет назад. Она позволяла широко применять высокоточное оружие и наносить удары в любое время суток, используя автоматизированные системы боевого управления и данные космической разведки. Дальнейшее повышение эффективности боевого применения тактической авиации руководство ВВС США связывает с массовым оснащением частей тактической авиации малозаметными, имеющими большой радиус действия и оснащенными новейшим оборудованием самолетами нового поколения F-22 и F-35, а также разведывательными и ударными БЛА. В ближайшие 10 лет Пентагон планирует создание инновационной системы оперативной разведки поля боя, которая должна соединять преимущества космических аппаратов (недостижимость для средств ПВО противника и глобальность разведки) с достоинствами воздушных беспилотных летательных аппаратов (большая продолжительность наблюдения и высокая оперативность доклада данных). Система из 24 космических аппаратов с РСА, размещенная на низких круговых орбитах высотой 770 км, может обеспечить высокую частоту просмотра театра военных действий (10...15 мин), что не позволит противнику осуществлять незаметную передислокацию. Проект получил наименование «Дискавери-2» (считается, что первая система «Дискавери-1» положила начало в 60-х годах созданию космических средств фотографической разведки). Требования Пентагона к спутниковому радиолокатору чрезвычайно высоки. Станция должна работать в трех основных режимах:

- 1) съемка местности (обзорная, маршрутная и детальная) с разрешением от 0,3 до 3 м;
- 2) автоматическое обнаружение движущихся целей (диапазон скоростей целей 4...100 км/ч);
- 3) картографическая съемка для формирования цифровых карт рельефа местности с точностью около 1 м.

Такое сочетание режимов работы РСА позволяет оператору-дешифровщику РЛИ последовательно решать весь цикл задач, связанных с поиском, обнаружением и распознаванием целей, определением их координат для дальнейшей выдачи целеуказания средствам поражения. РСА должна работать в трехсантиметровом диапазоне волн и использовать активную фазированную антенную решетку (АФАР). Она обеспечит электронное сканирование лучами в двух плоскостях для решения задач



видовой съемки, селекции движущихся целей, пассивной радиотехнической разведки и даже пространственной отстройки от сигналов постановщиков радиопомех.

Из рассмотренных примеров можно сделать вывод, что интеграция гражданских и военных систем в едином информационно-управляющем пространстве для реализации «Сетевых боевых операций» является ключевым направлением дальнейшего развития аэрокосмических информационных систем и уже доказала свою состоятельность. Одним из важных аспектов развития современных информационных технологий – интегрирование аэрокосмических средств, в том числе использование распределенных многопозиционных радиолокационных систем [36\*, 40\*, 43\*, 234].

#### **1.4. Задачи, решаемые космическими системами радиолокационного наблюдения двойного назначения**

Анализ современного состояния и перспектив совершенствования космических средств радиолокационного наблюдения позволяет сформулировать задачи, которые могут решаться этими средствами в глобальной аэрокосмической информационной системе, реализующей мониторинг воздушного и космического пространства и земной поверхности. В дальнейшем будем различать системы *военного назначения*, предназначенные для ведения разведки военных объектов и непосредственного обеспечения боевых операций и *гражданские системы*, предназначенные для решения хозяйственных и научных исследований. Их отличие от систем военного назначения состоит в том, что все характеристики аппаратуры (кроме ноу-хау фирм разработчиков, составляющую коммерческую тайну) доступны потребителям. Это не исключает использование материалов радиолокационной съемки гражданских систем различными специальными службами для мониторинга чрезвычайных ситуаций, природных катастроф, аварий, для охраны государственной границы, для нужд обустройства военных городков, полигонов и т.д. [218]. В этом смысле такие гражданские системы могут рассматриваться как *системы двойного применения*.

Многорежимные космические РСА военного назначения могут, за малым исключением, решать гражданские задачи. При соответствующей инфраструктуре распределения получаемой информации космические РЛИ могут распространяться на коммерческой основе. Современная концепция системного подхода к проектированию космических РСА [153\*, 335, 493\*] рекомендует рассматривать любую аппаратуру как предназначенную для двойного применения. Например, отечественные космические РБО космических аппаратов серии «Космос-1500» гражданского назначения обеспечивали ВМФ СССР информацией о ледовой обстановке в районах военно-морских баз ВМФ и фактически являлись системами двойного применения.

На основе анализа зарубежного опыта применения систем радиолокационного наблюдения космического базирования в табл. 1.1 приведен перечень задач, которые принципиально могут решаться с применением космической радиолокационной съемки в интересах гражданских и военных потребителей. Эти области применения условно по основному использованию названы «дистанционное зондирова-

ние земли» (ДЗЗ) и «видовая разведка». В первом столбце таблицы перечислены объекты наблюдения (земные покровы, инженерные сооружения и др.) или методы получения данных (одно- или многопозиционное зондирование, поляриметрия, интерферометрическая обработка и т.д.). Во втором столбце задачи, решаемые аппаратурой ДЗЗ в интересах военных потребителей или спецслужб, отмечены «\*» в качестве двойного применения.

Современная тенденция (системный подход) проектирования аппаратуры РЛН, как правило, предусматривает ее двойное применение. Это позволяет, оптимизируя параметры системы для основного назначения (гражданского или военного), закладывать в нее гибкие возможности для решения задач по второму направлению.

Такой подход имеет исторические корни в Российском промышленном производстве. Со времен Петра Первого при строительстве судов было требование устанавливать вдоль бортов судов привалочные брусья для установки на них пушек, в случае необходимости. В автобусах, изготавливаемых до середины прошлого века, предусматривалась задняя дверь, на случай перевозки раненых.

Примером обратной ситуации служат армейские машины времен Второй Мировой войны, на базе которых были позже созданы столь популярные среди населения внедорожники. Такой подход экономически оправдан, так как позволяет обрабатывать унифицированные составные части аппаратуры, на базе которых выпускаются варианты исполнения аппаратуры того или другого основного (первого) назначения. Целесообразно создание систем двойного назначения, в которых предусматривают режимы и каналы распределения информации для военных и гражданских потребителей с разными правами доступа к информации, как это реализуется в глобальных навигационных системах GPS, ГЛОНАСС, Galileo.

Следует также иметь в виду, что развитие и освоение гражданских технологий всегда способствует прогрессу в военных применениях. Как пример можно отметить резкое повышение производительности вычислительных средств за последнее десятилетие, оплаченное покупателями игровых приставок с 3D индикацией динамических сцен.

Представляет интерес сравнить требования к информационному продукту – радиолокационному изображению, требуемому для решения, приведенного в табл. 1.1 перечня задач в интересах одного или другого применения. Рассмотрим случай многорежимного гражданского РСА, а для военных РСА ограничимся работой в режиме мирного времени в соответствии с Регламентом радиосвязи. Будем считать исходно выбранными рабочий частотный диапазон и высоту орбиты. Важнейшими характеристиками получаемых РЛИ для гражданских РСА являются пространственное разрешение снимка, чувствительность РСА, поляризация на излучение и прием, а для военных РСА – разрешение РЛИ, чувствительность, а также полоса съемки и полоса обзора, от которых зависит оперативность получения информации от заданного района и время повторной съемки. Поставляемый информационный продукт должен быть комплексным РЛИ для возможности его интерферометрической обработки (карты рельефа, когерентные методы выявления изменений геометрии и обстановки).

**Таблица 1.1. Задачи двойного назначения, решаемые космическими системами радиолокационного наблюдения**

Объект наблюдения или методы получения данных	Дистанционное зондирование Земли	Видовая разведка
1	2	3
Глобальный мониторинг земной поверхности (суши и моря)	Исследования природных ресурсов Климатические исследования Обновление и уточнение карт Геологическое картирование	Стратегическая разведка Выявление подготовки военных операций
Детальная радиолокационная съемка локальных районов	Землепользование, составление планов участков для строительства Мониторинг катастроф	Оперативное наблюдение обстановки на военных объектах Изучение местности в районах готовящихся операций Разведка поля боя Оценка результатов боевых действий Обнаружение минных полей
Морская (водная) поверхность	Состояние волнения (бальность) Оценка направления и измерения скорости течений Экологический мониторинг загрязнений Взаимодействие океан-атмосфера Оценка биоресурсов Мониторинг катастроф	Оценка текущего состояния морской поверхности при планировании операций на ТВД
Морская поверхность – возмущения, вызванные внутренними волнами	Изучение топографии дна Геологическое картирование шельфа Изучение глубоководных течений	Обнаружение кильватерных следов для определения курса и скорости кораблей Обнаружение движущихся подводных лодок (ПЛ) с перископом Обнаружение движущихся подводных объектов (ПЛ, торпед и др)

Продолжение табл. 1.1

1	2	3
Морская поверхность – измерение поля уровня	Обнаружение опасных «волн-убийц» Раннее обнаружение цунами	Обнаружение ПЛД по эффекту Бернулли
Контроль надводной обстановки	Контроль районов рыбной ловли * Обнаружение контрабандистов в прибрежных акваториях	Глобальный контроль надводной обстановки в акваториях Мирового океана и морях с автоматическим обнаружением, определением класса, типа НК, курса, скорости
Наблюдение ледового покрова – морского льда	Обеспечение судовождения Климатические исследования Прогноз опасных подвижек льда в местах шельфовых разработок полезных ископаемых для проведения защитных мероприятий Обеспечение поисково-спасательных операций	Сопровождение морских операций ВМФ Сопровождение морских операций в полярных широтах, поиск мест, пригодных для всплытия ПЛД
Исследование ледового покрова – материкового льда	Климатические исследования Определение водо запасов материковых льдов Прогноз чрезвычайных ситуаций, вызванных подвижкой ледников Изыскательские работы при строительстве дорог, тоннелей и других объектов в горных районах Обеспечение поисково-спасательных операций в горных районах	Подготовка и обеспечение боевых операций в высокогорных районах
Интерферометрическая обработка радиолокационных изображений	Создание цифровых карт рельефа Обновление топографических карт	Построение карт рельефа для управления точным оружием Создание опорного материала для навигации ракет и головных частей по местности

Продолжение табл. 1.1

1	2	3
Картирование растительного покрова (сельскохозяйственные угодья)	Контроль агротехнологий, оценка необходимости и эффективности мер поддержки предприятий сельского хозяйства Экономическая разведка с контролем урожайности по зарубежным территориям Измерение влажности почвы	Обнаружение военной техники (ВТ) на открытой местности Планирование трасс передвижения ВТ
Картирование лесных массивов	Ведение лесного хозяйства, определение состояния лесов Оценка бонитета и объема биомассы лесных массивов Оценка ущерба от лесных пожаров Оценка послерубочной и пирогенной динамики состояния лесов Планирование участков для вырубки	Обнаружение скопленной техники и войск под пологом лесных массивов
Подповерхностное зондирование	Поиск залежей, полезных ископаемых, подземных запасов воды, нефти Мониторинг подземных инженерных сооружений, коммуникаций Обнаружение мест аварий	Обнаружение заглубленных инженерных сооружений, блиндажей, шахт и др.
Обнаружение изменений в окружающей обстановке (некоторые методы)	Археологические исследования Обновление картографического материала Мониторинг паводков, наводнений Обнаружение зон подтоплений, опустынивания, засоления и др	Оценка изменения оперативной обстановки на объектах (аэродромах, базах ВМС, военной техники в районах боевых действий и локальных конфликтов) Оценка состояния зон военных операций после нанесения удара Обнаружение перемещений мобильной техники

Продолжение табл. 1.1

1	2	3
Методы дифференциальной интерферометрии – обнаружение изменений в окружающей обстановке	Обнаружение повреждений дорожного покрытия, железнодорожных магистралей при воздействии природных факторов Обнаружение измеряемых сантиметрами подвигек земной поверхности, деформаций инженерных сооружений, трубопроводов и др. Обнаружение факта несанкционированного доступа к объектам	Выявление малых возмущений на объектах (следы от прохода техники или войсковых подразделений, постановки минных заграждений и т.д.) Обнаружение перемещений слаботражающей мобильной техники (автомашин, самолетов технологии Стелс и др.)
Методы дифференциальной интерферометрии – радиолокация «постоянных отражателей»	Контроль долговременных изменений инженерных конструкций, зданий Обнаружение разрушения объектов обустройства государственной границы и орожденных территорий	Выявление нарушений геометрии инженерных сооружений (мачт, мостовых конструкций, опор линий связи)
Методы индикации движущихся объектов	Контроль дорожного трафика	Обнаружение, индикация и определение скорости движущихся целей
Поляриметрическое зондирование	Идентификация растительных покровов, контроль фаз вегетации, оценка объема биомассы	Повышение вероятности обнаружения и распознавания объектов
Многопозиционное радиолокационное зондирование (тандемы КА)	Построение высокоточных карт рельефа Индикация целей, движущихся с малыми скоростями	Индикация целей, движущихся с малыми скоростями
Многопозиционное аэрокосмическое зондирование с применением БЛА	* Контроль государственной границы, зон рыболовства, обнаружение контрабандистов в прибрежных акваториях	Повышение помехозащищенности радиолокационных средств разведки Повышение вероятности распознавания целей по многооркурсным радиолокационным портретам

**Окончание табл. 1.1**

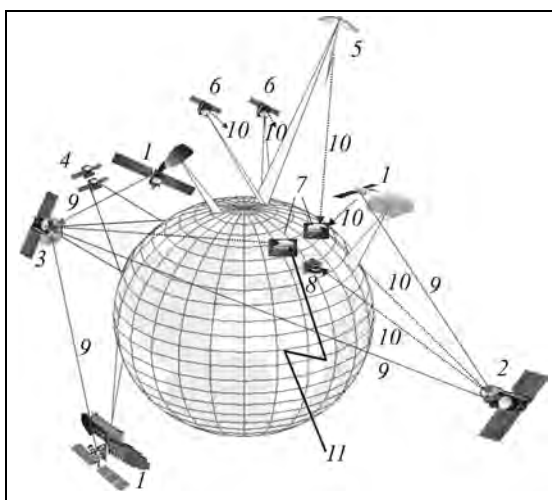
1	2	3
Все объекты и технологии обработки радиолокационной информации	Изучение планеты Земля	Повышение информативности средств РЛН
	Экспериментальная проверка и отработка новых методов радиолокационного зондирования	
Объекты наблюдения и технологии обработки данных.	Экспериментальная отработка элементов перспективной аппаратуры	
	Развитие технологий практического использования радиолокационной информации для решения текущих задач:	
Применение космической радиолокационной информации.	– гражданских потребителей – федеральные и муниципальные службы и предприятия (экологи, топографическая служба, МЧС, лесхозы, сельскохозяйственные, строительные предприятия, железная дорога, аэродромы, порты);	
	– частных потребителей (фермеры, туристы, краеведы);	
	– военных потребителей – инфраструктура военных округов и войсковых частей, военно-топографическая служба, боевые учения, пограничная служба	

Гражданские РСА должны иметь режим с разрешающей способностью, соответствующей полосе сигнала, выделенного Регламентом радиосвязи для выбранного диапазона волн. Чувствительность РСА должна позволять обнаруживать контрасты суши по отношению к изображению спокойной водной поверхности. Необходимо реализовать поляриметрический режим (возможно с некоторым ухудшением разрешения), по крайней мере, одна (горизонтальная или вертикальная) переключаемая поляризация на излучение и две поляризации – на прием (это необходимо для мониторинга растительного покрова и морской поверхности), иначе выходной информационный продукт проектируемого РСА будет неконкурентоспособным по сравнению с находящимися в эксплуатации или проектируемыми зарубежными РСА. Для военных РСА поляриметрический режим желателен, он позволяет повысить вероятность обнаружения и распознавания объектов на фоне подстилающей поверхности.

Из гражданских задач, требующих высокой оперативности, наиболее важными являются мониторинг стихийных бедствий и катастроф. Существуют Международные соглашения о взаимном информационном обеспечении чрезвычайных ситуаций странами, располагающими космическими средствами наблюдения – оптическими, радиолокационными. Для оперативного решения экстренных задач целесообразно присоединение к таким соглашениям.

Облик перспективного аэрокосмического радиолокационного сегмента глобальной информационной системы двойного назначения применительно к российским потребителям информации иллюстрирует рис. 1.4, цветной вариант которого приведен на обложке.

Применительно к задачам дистанционного зондирования Земли (включая двойное применение) состав действующей всемирной орбитальной группировки ДЗЗ включает в себя оптоэлектронные и ра-



**Рис. 1.4.** Структура аэрокосмического радиолокационного сегмента глобальной информационной системы двойного назначения: 1 – низкоорбитальные многорежимные РСА обзора земной и морской поверхности; 2 – спутник-ретранслятор на геостационарной орбите; 3 – спутник на геостационарной орбите с совмещенными ретранслятором и РЛС подсвета системы раннего предупреждения опасных океанических явлений; 4 – приемные танделы спутников системы предупреждения опасных океанических явлений; 5 – многорежимные РСА на геосинхронной орбите с питанием от ядерных энергетических установок; 6 – орбитальная группировка приемных микроспутников для бистатического зондирования с геостационарными или геосинхронными РЛС; 7 – региональные наземные центры приема и обработки радиолокационной информации; 8 – мобильные пункты приема и обработки в районах локальных конфликтов; 9 – лазерные каналы передачи широкополосных данных от радиолокационных датчиков к ретрансляторам на геостационарной орбите; 10 – широкополосные радиоканалы передачи информации на пункты приема от радиолокационных датчиков и спутников-ретрансляторов; 11 – каналы связи с зарубежными информационными системами



**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

диолокационные датчики с общими характеристиками, приведенными в табл. 1.2 и 1.3 [53, 529]. Указаны средства с пространственным разрешением до 10 м. Для сравнения приведены также средства военного назначения. Подробно характеристики космической радиолокационной аппаратуры приведены в гл. 13.

**Таблица 1.2. Космические аппараты с оптоэлектронными датчиками с разрешением лучше 10 м**

Наименование КА (системы)	Страна	Дата запуска	Разрешение, м		Полоса съемки, км
			Панхром	Мульти-спектр	
<b>КА с оптоэлектронными датчиками для ДЗЗ</b>					
TopSat (SSTL)	Великобритания	27.10.2005	2,5	5	10, 15
RapidEye-A	Германия	29.08.2008	—	6,5	78
RapidEye-B	Германия	29.08.2008	—	6,5	78
RapidEye-C	Германия	29.08.2008	—	6,5	78
RapidEye-D	Германия	29.08.2008	—	6,5	78
RapidEye-E	Германия	29.08.2008	—	6,5	78
EROS A1	Израиль	05.12.2000	1,8	—	14
EROS B1	Израиль	25.04.2006	0,7	—	7
Cartosat-1 (IRS-P5)	Индия	04.05.2005	2,5	—	30
Cartosat-2	Индия	10.01.2007	0,8	—	10
IRS-1D	Индия	29.09.1997	6,0	23	70, 142
Resourcesat-1 (IRS-P6)	Индия	17.10.2003	6,0	6, 23, 56	24, 140, 740
Beijing-1 (SSTL)	Китай	27.10.2005	4,0	32	600
KOMPSAT-1	Корея	20.12.1999	6,6	—	17
KOMPSAT-2	Корея	28.07.2006	1,0	4	15
Ресурс-ДК1	Россия	15.06.2006	1,0	3	28
GeoEye-1	США	06.09.2008	0,4	1,64	15
IKONOS	США	24.09.1999	1,0	4	11
QuickBird	США	18.10.2001	0,6	2,5	16
WorldView-1	США	18.09.2007	0,5	—	16
THEOS	Таиланд	01.10.2008	2,0	15	22, 90
FORMOSAT-2	Тайвань	20.04.2004	2,0	8	24
SPOT-5	Франция	04.05.2002	2,5	10	120
ALOS	Япония	24.01.2006	2,5	10	35, 70
<b>КА с оптоэлектронными датчиками военного назначения</b>					
Серия KH11	США	1976–1990 гг.	0,3...0,6	—	2,8...23
Серия KH12-1 – KH12-5	США	1992–2005 гг.	0,3...0,6	—	нет данных

**Глава 1. РЛС землеобзора космического базирования в глобальной системе ...**

**Таблица 1.3. Космические аппараты с аппаратурой радиолокационного наблюдения с пространственным разрешением до 10 м**

Наименование КА (системы)	Страна	Дата запуска	Наилучшее разрешение, м	Диапазон волн
<b>КА, предназначенные для ДЗЗ</b>				
TerraSAR-X	Германия	15.07.2007	1,0	X
Cosmo-Skymed-1	Италия	08.06.2007	1,0	X
Cosmo-Skymed-2	Италия	08.12.2007	1,0	X
Radarsat-1	Канада	04.11.1995	8,5	C
Radarsat-2	Канада	14.12.2007	3,0	X
YaoGan WeiXing 1 (JB-5)	Китай	27.04.2006	5,0	L
YaoGan WeiXing 3 (JB-5-02)	Китай	12.11.2007	5,0	L
ALOS	Япония	24.01.2006	10,0	L
<b>КА военного назначения</b>				
Lacrosse-2/Vega	США	02.03.1991	0,67	предположит. X
Lacrosse-3/Onyx	США	24.10.1997	0,67	предположит. X
Lacrosse-4/Onyx	США	17.08.2000	0,67	предположит. X
SAR Lupe-1	Германия	19.12.2006	0,5	X
SAR Lupe-2	Германия	02.07.2007	0,5	X
SAR Lupe-3	Германия	01.11.2007	0,5	X
SAR Lupe-4	Германия	27.03.2008	0,5	X

Высокую эффективность обеспечивает совместное использование оптоэлектронных средств и радиолокационных средств наблюдения (видовой разведки), обладающих возможностью проведения точных измерений геометрии объектов, их радиофизических характеристик, рельефа местности радиолокационными методами. Сформированные по результатам измерений цифровые банки данных фоноцелевой обстановки и применение современных вычислительных методов для автоматической и автоматизированной классификации объектов и оценки динамики их состояния станут основой информационного обеспечения практической деятельности во многих областях в интересах гражданских и военных потребителей.

При выборе параметров проектируемой системы радиолокационного наблюдения, которая, в принципе, может включать в себя орбитальную группировку с набором многофункциональных радиолокационных датчиков с разными режимами работы, необходимо исходить из требований к аппаратуре в зависимости от решаемых задач. В первую очередь это относится к разрешающей способности получаемых радиолокационных изображений (РЛИ) и периодичности обновления информации. Сводные данные, заимствованные из разных публикаций [118, 223\*, 432\*, 529], приведены в табл. 1.4.

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

**Таблица 1.4. Требования к разрешающей способности РСА и периодичности обновления информации**

Решаемая задача	Обнаружение, м	Распознавание, м		Периодичность, сутки
		класс	тип	
Мониторинг океана, ледовая разведка	300	300	70	<3
Судоходство, рыбная ловля	15...300			<1
Общее картографирование	5...30			≥30
Морские порты	30	15	6	
Населенные пункты	60	30		
Железнодорожные узлы	30	15	6	
ВПП	40	9,0		
Ведение кадастра	2...3			
Геологическое картирование	5...30			>30
Лесное, сельское хозяйство	3...30			<5
Мониторинг катастроф, контроль зон	<1,5			<0,1
Мосты	6	4,5	1,5	
Аэродромы, аэропорты	6,0	4,5	3,0	
Самолеты на аэродроме	4,5	1,5	0,9	
Ракетные комплексы, ракеты	3,0	1,5		
Командные пункты	3,0	1,5	0,9	
РЛС	3,0	0,9	0,3	
Средства радиосвязи	3,0	1,5	0,3	
Склады	1,5	0,6	0,3	
Воинские части или места расположе-	6	2,1	1,2	
Оборудование баз ВВС	6	4,5	3,0	
Артиллерия	0,9	0,6	0,15	
ЗРК	3	1,5	0,6	
Автотранспорт	1,5	0,6	0,3	
Морские суда (средние)	7,5	4,5	0,6	
Подводные лодки (на поверхности)	9	6	1,5	
Минные поля на суше	30	6	1,5	

Сопоставление приведенных в табл. 1.4 требований к разрешающей способности аппаратуры и достигнутых параметров космических средств наблюдения (см. табл. 1.2 и 1.3) показывает, что решение задачи распознавания класса и типа объектов требует повышения информативности средств наблюдения, что применительно к космическим РСА может достигаться не только путем улучшения пространственного разрешения, но и использованием специфических признаков, осно-

ванных на измерении радиофизических свойств объектов (поляризации, резонансных явлений, интерферометрии) или косвенных признаков, таких как размеры и конфигурация радиолокационных теней от объектов наблюдения, наличие на изображениях подстилающей поверхности «лысых мест», вызванных азимутальным смещением отметок от движущихся целей, направления и углы схождения кильватерных следов от движущегося корабля в зависимости от его скорости, отметки переотражения от его надстроек и т.д.

Для перечисленных в первом столбце табл. 1.1 типов объектов можно дать их обобщенное определение и сформулировать задачи обнаружения и распознавания применительно к видовым средствам радиолокационного наблюдения (РЛН). При этом любой объект как естественного, так и искусственного происхождения может быть определен как локальная аномалия (или набор локальных аномалий) в однородном окружении. Как локальную аномалию будем рассматривать набор ярких отметок от компактного отражающего объекта, темные отметки от областей, не дающих отражения в сторону РЛС, изменение текстуры участка поверхности.

Наличие достаточно большого объема накопленных данных по определенным территориям (априорной информации для дешифрирования конкретного снимка) заменяет классическую задачу обнаружения и распознавания, типичную для контроля воздушного пространства, на задачу выявления изменений в оперативной обстановке и идентификации обнаруженных аномалий. Фактически требуется обнаружение аномалии и распознавание ее типа аномалий при обработке не всего полученного изображения, а только небольших фрагментов, содержащих изменения.

Часть из указанных в табл. 1.1 задач требует высокой оперативности получения информации, что наряду с высоким разрешением является приоритетным для перспективных РСА. Следует отметить, что при пространственном разрешении лучше 3 м резко снижаются ошибки идентификации растительных покровов даже без применения поляризационной селекции. Это связано с повышением роли текстурных особенностей отражающей поверхности. Кроме того, возможен обмен пространственного разрешения на радиометрическое, что позволяет анализировать гистограммы  $\sigma^0$  для типизации поверхности. Аналогично, для идентификации типа ледовых полей требуется разрешение около 75 м, при этом для дешифрирования проводят усреднение отсчетов (32×32), повышающее радиометрическое разрешение по площади. На сглаженном РЛИ выявляется текстура ледовых образований, характерная для данного типа ледового покрова [87].

### **1.5. Концепция использования космических средств радиолокационного наблюдения в глобальной информационной системе и ее национальных сегментах**

Анализ возможностей, реализуемых современными космическими системами радиолокационного наблюдения (главы 2, 8, 9, 13), позволяет сделать вывод, что в настоящее время они стали неотъемлемым звеном глобальных сетцентрических информационных систем [36\*, 46\*, 96, 331, 350, 492].

Сформулируем концепцию использования радиолокационных систем в глобальной информационной системе и ее национальных сегментах.

Рассмотрим фрагмент информационной системы (или, конкретнее – геоинформационной системы), относящийся к получению и распределению видовой и картографической информации, т.е. данных, полученных на основе тематической обработки радиолокационных снимков (включая количественную интерпретацию данных радиолокационного зондирования, оценку оперативной обстановки в районах съемки, выявление ее изменений), данных координатной обработки снимков (обновление картографического материала, построение карт рельефа местности, выявление изменений геометрической конфигурации объектов), а также формуляров обнаруженных движущихся целей и др.

Гражданским аналогом таких глобальных информационных системы является Интернет-система распределения карт и космических снимков земной поверхности Google Map [537]. Ресурсы Google Map предоставляют в свободном доступе детальные космические снимки поверхности Земли с разрешающей способностью до 1 м. Однако в свободном доступе отсутствуют детальные снимки территорий (например, военных баз), которые могут быть квалифицированы как нарушение суверенитета отдельных стран.

Фактически, Google Map объединяет данные, полученные с различных спутников, также как и должна это делать сетевая система военного назначения. Необходимо также отметить, что системы навигации и позиционирования GPS и ГЛОНАСС, являющиеся в настоящее время элементами глобальных сетевых систем, применяются как в гражданских, так и в военных целях, однако имеют при этом различные каналы для доступа, обеспечивающие разные уровни точности позиционирования.

Применительно к задачам военной разведки или мониторинга катастроф и в зависимости от конкретных ситуаций радиолокационные снимки могут иметь разный приоритет по отношению к оптическим снимкам (с одинаковой или разной разрешающей способностью), полученным ранее (априорная опорная информация) или синхронно с радиолокационными снимками, если метеорологические условия позволяют вести оптическую съемку.

В первой ситуации (использование априорной опорной информации) радиолокационная съемка выполняет функции *оперативной видовой доразведки* – получение дополнительных данных для принятия решения. Так, например, при мониторинге катастроф наличие оптических снимков территории бедствия, а также ранее полученных отшифрованных радиолокационных снимков, снабженных каталогом обнаруженных ярких объектов (брошенная техника, обломки аварий в тундровых и таежных районах), позволяет вести автоматический поиск новых образований и по их характеру диагностировать предшествующие события, локализовать район для высылки поисково-спасательных групп и принимать решение о привлечении дополнительных специализированных средств (например, проведения радиолокационной съемки в других диапазонах волн, с другими ресурсами или набором поляризаций).

Вторая ситуация относится к случаям отсутствия оптических снимков, невозможности их оперативного получения или их недостаточной информативности. Тогда радиолокационная информация имеет высший приоритет по отношению к оптическим средствам благодаря специфическим особенностям радиолокационного зондирования – всепогодности, возможностям получения информации о радиофизических свойствах объектов, обнаружения замаскированных или скрытых растительностью объектов, применения высокоточной координатной обработки, а также выявления изменений в оперативной обстановке методами корреляционной обработки или дифференциальной интерферометрии.

Соответственно **концепция использования космических средств РЛН в глобальной информационной системе** может включать в себя следующие положения:

- получаемая с помощью космических средств РЛН двойного применения открытая информация, в том числе срочная (при мониторинге катастроф и проведении поисково-спасательных работ), может иметь свободное распространение (на коммерческой основе или по взаимному обмену);
- специальная информация, предназначенная для использования в национальном сегменте, должна передаваться по специальным защищенным каналам, причем для доведения фрагментов этой информации до конкретных локальных потребителей могут использоваться открытые каналы с применением шифрования;
- должна использоваться комбинированная сетевая распределенная система, оборудованная мобильными (подвижными наземными, корабельными) пунктами приема/обработки данных радиолокационного зондирования, обеспечивающих мониторинг инфраструктуры отдаленных районов (комплексов разработки полезных ископаемых, Севморпути и др.), а также зон локальных конфликтов. Целесообразно использование в мобильных пунктах стандартных аппаратно-программных средств для их сегментации и экстренной углубленной обработки.

Проведенное рассмотрение места и роли космических систем радиолокационного наблюдения в глобальной системе аэрокосмического мониторинга позволяет сделать следующие выводы:

1) сочетание современных оптоэлектронных и радиолокационных средств землеобзора космического базирования обеспечивает получение детальной видовой информации для решения широкого круга задач в интересах гражданских и военных потребителей. Независимость радиолокационной съемки от метеорологических условий и времени суток, а также применение интерферометрической обработки снимков позволяет отслеживать изменения оперативной обстановки на объектах наблюдения;

2) ценные свойства радиолокационной съемки состоят в возможности измерения геометрических характеристик объектов с высокой точностью, а также измерения радиофизических характеристик объектов;

3) информационное обеспечение военных операций и мониторинга чрезвычайных ситуаций должно базироваться на использовании сетевых систем с привлечением всех доступных аэрокосмических датчиков и каналов связи.

### ***Радиолокационные системы землеобзора космического базирования***

---

Должна быть предусмотрена регулярная архивная съемка территорий предполагаемых активных действий с составлением и обновлением цифровых карт рельефа, формированием банка фоноцелевой обстановки и радиолокационных портретов объектов;

4) проектируемая радиолокационная аппаратура землеобзора космического базирования должна предусматривать многорежимное многофункциональное использование и быть рассчитана на двойное, гражданское и военное применение.

Далее в монографии рассматриваются конкретные вопросы, связанные с получением радиолокационных снимков средствами РЛН космического базирования и извлечением информации для потребителей. Глава 2 посвящена рассмотрению механизмов формирования сигналов, отраженных объектами наблюдения и информационных признаков, содержащихся в получаемых данных радиолокационного зондирования, по которым можно идентифицировать объекты и проводить количественную оценку их параметров.

---

## Глава 2

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИОВОЛН С ОБЪЕКТАМИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

### 2.1. Объекты радиолокационного наблюдения и их свойства

Объектами радиолокационного наблюдения в широком смысле являются физические объекты, которые могут быть обнаружены с использованием методов радиолокационного зондирования. В общем виде под объектом радиолокационного наблюдения, характеризуемого некоторыми радиофизическими свойствами, будем понимать локальную аномалию в однородном окружении. Будем рассматривать также другой тип объекта (участка местности), радиофизические характеристики которого несут информацию о нем или его состоянии, характеризуемой изменчивостью за определенный промежуток времени. К этому типу объектов относятся, например, изменения геометрии инженерных конструкций, появление ям на дорожном покрытии, просадки почвы. Однако, обнаруживаемое путем радиолокационного зондирования изменение влажности почвы после дождя, как правило, не содержит полезной информации. Вместе с тем, участки земли повышенной влажности в районе защитных дамб явно относятся к объектам наблюдения.

К объектам радиолокационного наблюдения относятся природные объекты, в том числе с воздействием антропогенных факторов, искусственные объекты, включая различные инженерные сооружения и объекты техники, живые объекты (люди, животные, косяки рыб и др.). В связи с различием радиофизических свойств и механизмов рассеяния электромагнитной энергии от различных земных покровов целесообразно раздельное рассмотрение наблюдаемых объектов суши (геологическая структура земной поверхности, растительный покров, наземные и подземные объекты и сооружения) и образования на водной поверхности (морей, озер, рек). Объектами радиолокационного наблюдения являются также волновые явления, обусловленные топографией дна, и т.д. Для обозначения конкретных объектов (преимущественно – компактных) используют также термин «радиолокационные цели».

При облучении радиоволной какого-либо объекта в нем наводятся электрические токи, создающие в свою очередь электромагнитное поле, распространяющееся в направлении РЛС. Радиоволны имеют векторные свойства, которые характеризуются поляризацией, определяющей направления векторов электрического и магнитных полей в пространстве.

Энергетические, фазовые и поляризационные характеристики отраженного поля определяются многими факторами [79, 91, 193, 196, 214]: длиной облучающей волны, размерами, конфигурацией, электрическими характеристиками (диэлектрической и магнитной проницаемостью, затуханием) объекта или его элементов, расположением относительно направления облучения.



В современной практике результатом радиолокационной съемки является калиброванное по значению эффективной площади обратного рассеяния цифровое радиолокационное изображение. Содержащаяся в нем количественная информация о подстилающей поверхности и объектах на ней позволяет применить измерительные методы при тематической обработке радиолокационных снимков.

Принимаемый радиолокатором сигнал от наблюдаемой поверхности характеризует ее отражающие свойства (удельную эффективную площадь обратного рассеяния) в диапазонах волн работы РСА с учетом поляризаций на излучение и прием, изменение фазы сигнала при отражении; пространственно-статистические характеристики (гистограммы распределения, корреляционные функции и т.д.). Точность оценки этих характеристик во многом зависит от возможности усреднения измеренных параметров по площади участков (сегментов) с однородной статистикой для данного типа поверхности (морская поверхность, ледовые поля, сельскохозяйственные и лесные угодья и т.д.).

При высоком пространственном разрешении 0,6...1 м, реализуемом современными космическими РСА, размеры элемента разрешения на получаемом РЛИ за редким исключением (кроме специальных точечных целей или транспондеров, применяемых для калибровки РСА) значительно меньше геометрических размеров наблюдаемых объектов. Радиолокация с такой детальностью и возможностью получения трехмерных радиолокационных портретов объектов получила название «Радиовидение» [118]. В этих условиях *классическая задача обнаружения объектов по превышению мощности сигнала над окружающим фоном* (например, по критерию Неймана–Пирсона) во многих случаях трансформируется в комбинацию локальных задач, общим свойством которых является обнаружение локальных аномалий относительно окружающей поверхности с однородными статистическими характеристиками:

- обнаружение положительных контрастов от ярких компактных или распределенных объектов;
- обнаружение отрицательных контрастов пространственно распределенных объектов (нефтяные пятна на морской поверхности, ВПП и рулежные дорожки аэродромов, радиолокационные тени от высоких объектов);
- обнаружение изменений текстуры РЛИ (кильватерные следы движущихся кораблей, аномалии на морской поверхности от движущихся подводных объектов) или изменений фазовой структуры комплексного РЛИ, вызванных, например, появлением выбоин на асфальтовом шоссе [369].

## **2.2. Спектр электромагнитных колебаний, используемых для наблюдения земной поверхности из космоса**

### **2.2.1. Диапазоны частот, выделенные Регламентом радиосвязи для радиолокационного зондирования Земли из космоса**

В современных космических РСА, применяемых для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используют выделяемые Международным регламентом радиосвязи диапазоны волн [210]. Для их обозначения обычно применяют буквенные символы [214]. Исходные кодовые группы (*P*, *L*, *S*, *X* и *K*) были введены в США в годы

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

второй мировой войны из соображений секретности, но сохранились после снятия секретности и широко используются в современной зарубежной и отечественной литературе. Регламент радиосвязи является правовым документом, определяющим категории служб – (типов радиоэлектронной аппаратуры). В нем предусмотрено распределение частот по двум категориям приоритетности – на первичной основе (приоритетная) и на вторичной основе, службы которой не должны создавать помех службам, которым частоты уже присвоены или могут быть присвоены позже на первичной основе. Они также не могут требовать защиты от вредных помех со стороны станций первичных служб.

В Международном регламенте радиосвязи приведены особенности использования частот в разных регионах. Их оговаривают в «Примечаниях». На территории Российской Федерации действуют Регламент радиосвязи РФ и Таблица распределения полос частот [199, 217].

Применительно к радиолокационной съемке Земли из космоса Регламент радиосвязи оговаривает службы, обозначенные как: «Служба космических исследований (активная)», «Спутниковая служба исследований Земли (активная)», «Спутниковая (космос–Земля)». Основные выделенные диапазоны с шириной полосы частот, достаточной для решения задач ДДЗ, приведены в табл. 2.1. Общее наименование диапазонов частот согласно Регламенту радиосвязи: ОВЧ (очень высокие частоты) – метровые волны, частоты 30...300 МГц, УВЧ (ультравысокие частоты) – дециметровые волны, частоты 300...3000 МГц, СВЧ (сверхвысокие частоты) – сантиметровые волны, частоты 3...30 ГГц. В дальнейшем тексте будут также ссылки на *Ka*-диапазон волн 20...30 ГГц, используемый в радиолиниях передачи информации от РСА космического базирования на наземные приемные пункты.

**Таблица. 2.1. Частотные диапазоны для космических РСА**

Наименование диапазона	Условные обозначения: буквенное (числовое)	Диапазон частот, ГГц	Диапазон длин волн, см	Полоса частот, МГц	Примечание
ОВЧ (VHF)	—	0,137...0,144	208...219	7	На вторичной основе
УВЧ (UHF)	<i>P</i> (70 см)	0,432...0,438	69,5...70	6	На вторичной основе
УВЧ (UHF)	<i>P</i> (70 см)	0,440...0,460	65,2...68,18	20	Радиолокационная служба
УВЧ (UHF)	<i>L</i> (23 см)	1,215...1,300	23,08...24,7	85	На первичной основе
СВЧ (SHF)	<i>S</i> (10 см)	3,100...3,300	9,09...9,68	200	На вторичной основе
СВЧ (SHF)	<i>C</i> (5,6 см)	5,250...5,570	5,38...5,714	320	На первичной основе
СВЧ (SHF)	<i>X</i> (3,5 см)	8,025...8,650	3,47...3,74	625	На первичной основе
СВЧ (SHF)	<i>X</i> (3 см)	9,300...9,800	3,03...3,22	600	На первичной основе
		9,800...9,900			На вторичной основе
СВЧ (SHF)	<i>Ku</i> (2 см)	13,4...13,75	2,142–2,238	600	На первичной основе
		13,75...14,0			На вторичной основе

Следует отметить, что распределение частот в Международном регламенте регулярно уточняется. Так, в редакциях Регламента, относящихся к 1970–1980 гг., космическая радиолокационная съемка в  $P$ -диапазоне не была предусмотрена, а в новой редакции выделена полоса 6 МГц. Значительно расширены полосы частот в  $X$ - и  $C$ -диапазонах волн – с 300 до 600 МГц в  $X$ - и со 100 до 320 МГц в  $C$ -диапазоне. В ряде случаев по согласованию с Государственной Комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) [199] и с учетом региональных ограничений возможны отступления от Регламента, а также расширение полосы частот радиолокационной съемки, например за счет службы «Радиолокационная» (служба радиоопределения для целей радиолокации).

В радиолокаторах землеобзора космического базирования, как правило, используют импульсные зондирующие сигналы, характеризующиеся длительностью импульса  $\tau$ , шириной спектра  $\Delta F$ , несущей частотой  $f_0$  и частотой повторения  $F_p$ . Возможна работа немодулированными короткими импульсами (ширина спектра  $\Delta F = 1/\tau$ ), длительность которых определяет разрешающую способность по наклонной дальности (РБО «Чайка» КА УС, РСА «Меч-К», «Меч-КУ» КА «Космос-1870» и «Алмаз-1»). В современных РСА с целью повышения энергетического потенциала используют широкополосные зондирующие импульсы с  $\Delta F = k_c / \tau$ , где  $k_c = \Delta F \tau \gg 1$  – коэффициент сжатия. В основном применяют сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), в редких случаях – фазоманипулированные (ФМ) сигналы.

В практике создания и применения космических РСА реализуется одночастотное зондирование (РСА  $X$ -,  $C$ -,  $S$ - или  $L$ -диапазонов волн, в перспективе  $P$ -диапазона) или многочастотное зондирование в двух вариантах:

1) синхронное зондирование с использованием многочастотных РСА, например комплекс SIR-C/X-SAR (США) космического аппарата Space Shuttle, включающий РСА  $X$ -,  $C$ - и  $L$ -диапазонов, российские проекты бортовых радиолокационных комплексов (БРЛК)  $X$ -,  $L$ - и  $P$ -диапазонов КА «Алмаз-1В» и «Аркон-2» [215, 548];

2) несинхронное зондирование с комбинацией изображений, полученных независимо одночастотными РСА в разное время и разных условиях наблюдения.

Многочастотное зондирование в обоих вариантах аналогично обработке спектрозональных снимков в оптическом диапазоне электромагнитного спектра.

В современной радиолокации получают также распространение радары со сверхширокополосными зондирующими сигналами (СШП). Для таких систем относительная ширина полосы  $B_f = (f_H - f_L)/(f_H + f_L)$  близка к единице, где  $f_H$  и  $f_L$  – самая высокая и самая низкая частотные компоненты спектра сигнала. Сверхширокополосные сигналы нашли ряд применений в видеоимпульсных радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (ВИРСА), размещаемых на движущихся платформах или самолетах. Сигнал, использующийся в ВИРСА – это не имеющий несущей частоты импульс (или кодированная последовательность импульсов) с большой относительной шириной спектра [52, 239, 272, 391].

Стремительные технологические достижения в создании твердотельных электронных и оптоэлектронных приборов, микроволновых источников с высокой мощностью и сверхбыстрых цифровых ЭВМ обещают в перспективе реализацию рентабельных СШП радарных систем. В настоящее время различные типы видеоимпульсных радиолокаторов используют в медицине, в гуманитарной и военной

## **Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения**

деятельности по картографированию минных полей, в археологии. Известны бортовые видеоимпульсные радиолокаторы, установленные на самолетах, вертолетах и дирижаблях, применяемые для разведки толщины льда, подземного зондирования, измерения небольших глубин озер, водоемов и др.

За прошедшие годы прошло большое число конференций и семинаров, на которых вопросы широкополосных и сверхширокополосных (СШП) сигналов и систем рассматривались как ключевые (The 11th International Conference on Ground-penetrating Radar. – Columbus, Ohio State University, USA. – June, 2006; The 12th International Conference on Ground-penetrating Radar. – University of Birmingham, United Kingdom. – June, 2008; 14-я Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, апрель 2008 г.; The «European Microwave Week», Amsterdam, Нидерланды, October, 2008 и др.).

За рубежом создаются нормативные документы, относящиеся к применению СШП-сигналов и устройств, в частности, импульсных локаторов, имеющих широкий сплошной спектр излучаемого сигнала, что может привести к интерференции с другими СВЧ-устройствами (системы глобального позиционирования, различные типы связи и т.д.) и, как следствие, к конфликту с существующими нормами и правилами. В России нет пока нормативного документа, относящегося к СШП-устройствам, но можно ориентироваться на документы Федеральной комиссии связи США [306, 307]). Создаются аналогичные документы других стран: Европейского союза [304], Канады, Австралии и других, но с ещё более жёсткими требованиями. Очевидно, что и российские производители СШП-устройств столкнутся с подобными проблемами в ближайшее время [239].

В частности, FCC установила, что СШП-устройства для наблюдения через оптически непрозрачные преграды могут создаваться либо на частотах ниже 960 МГц, либо в диапазоне частот 1990...10600 МГц. При этом спектральная плотность излучения должна быть не более минус 41,3 дБм/МГц.

Комиссия FCC относит к СШП *сигналы, обладающие хотя бы одним из следующих свойств:*

- разность между верхней  $f_H$  и нижней  $f_L$  частотами спектра (ширина спектра по уровню минус 10 дБ) не менее 500 МГц;
- отношение ширины спектра  $f_H - f_L$  к его средней частоте  $(f_H + f_L)/2$  (относительная полоса частот) не менее 0,2.

### **2.2.2. Изобразительные свойства радиолокационных снимков в зависимости от длины волны РСА**

Под изобразительными свойствами аэрокосмических снимков обычно понимают их пригодность для визуального дешифрирования. Первичным дешифровочным признаком на снимке является интенсивность пикселя. Модифицированные дешифровочные признаки формируются путем выявления и формализации структурных, текстурных и контекстных свойств объектов различных классов [3, 7, 12, 104]. Изобразительные свойства снимков характеризуют связь между техническими параметрами, такими как пространственное разрешение, масштаб изображения, и возможно-

стями выделения на снимке различных элементов местности – линейных контуров, участков растительности с разными градациями яркости и текстурой, поверхностных структур почвенного слоя и водной среды, искусственных сооружений и т.д.

Основной фактор, ухудшающий изобразительные и измерительные свойства радиолокационных изображений (РЛИ) по сравнению с оптическими, связан с повышенной зернистостью РЛИ, обусловленной спекл-шумом – когерентным сложением откликов от большого количества элементарных отражателей, попадающих в элемент разрешения РСА [119]. Поэтому в отображении однородного фона появляется пятнистость, вызванная флуктуациями суммарного процесса при переходе от одного элемента к другому.

Спекл-шум ухудшает радиометрическое разрешение РЛИ (см. раздел 3.5). Для снижения спекл-шума применяют рассмотренные в гл. 7 методы фильтрации РЛИ. Но это приводит к потере пространственного разрешения РЛИ, а также полезной информации, содержащейся в спекл-шуме, которая может быть использована для идентификации пространственно распределенных объектов.

В отличие от шумов приемника спекл-шум имеет мультипликативный характер – его мощность пропорциональна мощности отраженного сигнала. В результате оказывается, что при фиксированном пространственном разрешении и масштабе изобразительные свойства РЛИ в основном зависят от исходных контрастов сигналов, отраженных от наблюдаемых объектов и подстилающей поверхности, которые в свою очередь зависят от рабочей длины волны РСА.

Анализ радиолокационных снимков традиционных «узкополосных» РСА, полученных в диапазонах волн, выделенных Регламентом радиосвязи для зондирования Земли из космоса, показывает, что по общему характеру снимки близки. На более длинных волнах лучше различаются контрасты растительного покрова, выше проникающая способность под крону леса, выше вероятность обнаружения малоразмерных объектов на фоне местности. Волны *P*- (70 см), *VHF*- (1,5...2,5 м) диапазонов способны проникать под слой почвы с возможностями обнаружения заглубленных объектов и выявления подповерхностных геологических структур.

Эффективность этого направления в развитии космических РСА экспериментально доказана материалами дистанционного зондирования с помощью традиционных самолетных РСА, работающих в *P*- и *VHF*-диапазонах волн, в частности, БРЛК ИМАРК [37\*, 185\*], РСА «Компакт» [66]. Известны также положительные результаты зондирования Луны при использовании РСА с длиной волны 15 м на спутнике «Аполлон-17» [445, 562].

**Основные преимущества видеоимпульсных РСА** в сравнении с традиционными «узкополосными» РСА состоят в следующем:

- короткие импульсные сигналы, как правило, не создают помех для аппаратуры другого типа, что облегчает применение таких сигналов в космической аппаратуре ДЗЗ;
- возможно получить высокое пространственное разрешение до единиц дециметров, что обеспечивает распознавание малоразмерных целей по их видеопортретам;
- возможно распознавание типа объектов по их резонансным свойствам;

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

- имеются широкие возможности сглаживания флуктуаций (спекл-шума) выходного сигнала от шероховатых поверхностей, что облегчает их идентификацию;
- возможно обнаружение объектов под растительным покровом и заглубленных объектов благодаря проникающей способности метровых радиоволн.

Рассмотрим особенности использования частотных диапазонов традиционных «узкополосных» РСА для решения задач ДЗЗ, обнаружения и наблюдения а также подводных объектов – топографии морского дна и шельфа и движущихся подводных объектов. Отметим особенности зондирования в метровом диапазоне (*VHF*) применительно к созданию перспективных космических РСА.

Проблема оптимального выбора рабочих диапазонов волн для РСА является ключевым вопросом при проектировании радиолокационной аппаратуры ДЗЗ. Как следует из табл. 2.1, наибольшие различия частотных диапазонов состоят в выделенных полосах частот, что определяет реализуемую разрешающую способность поперек трассы КА. Для получения разрешающей способности РСА поперек линии пути в доли метра нужна полоса зондирующего сигнала 300...500 МГц. В соответствии с ограничениями, определяемыми Регламентом радиосвязи (табл. 2.1), получение такого разрешения возможно в *Ku*- ( $\lambda \sim 2$  см), *X*- ( $\lambda \sim 3$  см) либо в *C*- ( $\lambda \sim 5,6$  см) диапазонах волн. Метровое разрешение реализуется в *S*-диапазоне волн ( $\lambda \sim 10$  см). Общая закономерность состоит в том, что с уменьшением длины волны, в частности, в сантиметровом *X*-диапазоне, легче реализовать высокое (метровое и субметровое) пространственное разрешение. Но следует учитывать и различие отражающих свойств объектов в разных частотных диапазонах.

Изобразительные свойства радиолокационных снимков при наблюдении растительного покрова, а также при изучении геологической структуры земной поверхности выше (более выражены) в дециметровом *L*-диапазоне (разрешение от 3 м) и приближающемуся к нему в *S*-диапазоне волн (рис. 2.1), чем в *X*- и *C*-диапазонах волн. Зондирование в *Ku*-диапазоне, несмотря на возможность реализации субметрового разрешения, имеет ограниченные возможности, его применение рассматривается для исследования ледникового покрова.

На рис. 2.1 (см. также рис. Ц.1 цветной вкладки) приведены радиолокационные снимки, снятые в *X*-, *C*-, *S*- и *L*-диапазонах волн в ходе экспериментов, проведенных фирмой JPL, США совместно с НПО машиностроения (ныне ОАО «ВПК «НПО машиностроения») и НПО «Вега» (ныне ОАО «Концерн «Вега»), СССР. Они показывают различие отражения радиоволн от разного типа местности [223\*, 440\*].

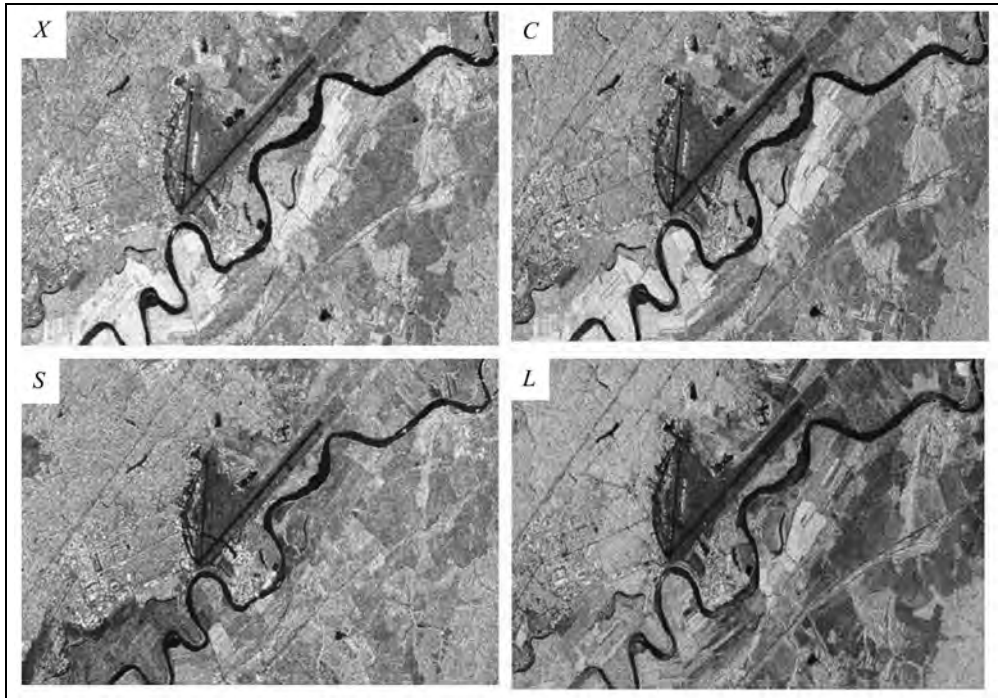
Как правило, в *X*- и *C*-диапазонах уровни отраженных сигналов выше, чем в *L*- и *S*-диапазонах, в которых **контрасты изображения подстилающих поверхностей значительно больше**. Это способствует

- повышению вероятности определения типа растительности, что важно для решения задач землепользования и ведения лесного хозяйства;
- росту вероятности обнаружения малоразмерных целей на фоне местности, что важно для мониторинга чрезвычайных ситуаций;
- ведению военной разведки.

На более длинных волнах обеспечивается измерение удельных объемов лесной биомассы в отличие от сантиметровых волн (*X* и *C*), для которых быстро на-

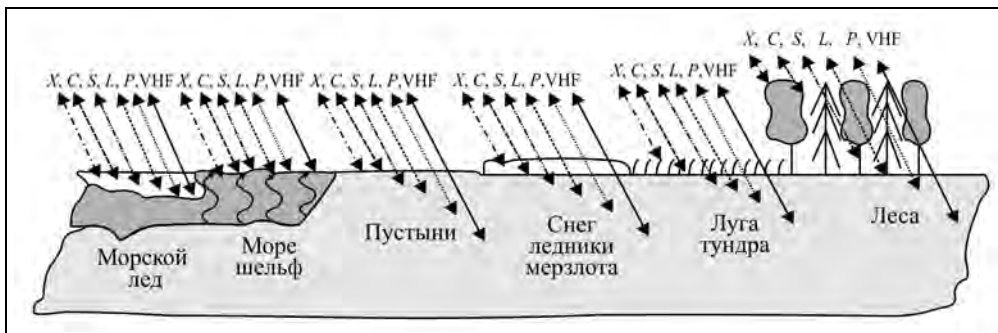
**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

ступает насыщение в значениях  $\sigma^0$ . Как видно из рис. 2.1 в  $X$ - и  $C$ -диапазонах волн отражение от сельскохозяйственных угодий в пойме реки значительно превышает отражение от лесного массива (левый верхний угол РЛИ).



**Рис. 2.1.** Радиолокационные снимки одного района, снятые в  $X$ -,  $C$ -,  $L$ -диапазонах волн (SIR-C/X-SAR), и в  $S$ -диапазоне волн (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»)

На рис. 2.2 иллюстрируется проникающая способность радиоволн разных частотных диапазонов. Для большинства типов местности (кроме воды с большой диэлектрической постоянной воды  $\epsilon \sim 80 + j \cdot 60$ ) проникновение радиоволн в подповерхностные слои (например, почва, растительный покров) возрастает с увеличением длины волны РСА.



**Рис. 2.2.** Проникающая способность различных диапазонов волн

## **Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения**

---

Особенности прохождения радиоволн через слоистые земные покровы и количественные значения коэффициентов затухания радиоволн в среде распространения, характеризующие проникающую способность, приведены в разделах 2.6 и 2.10.

### **2.2.3. Влияние трассы распространения сигнала на возможности радиолокационного наблюдения в разных диапазонах волн**

При космическом зондировании трасса прохождения излученных сигналов до цели и отраженных – до приемной антенны РСА включает в себя тропосферу и ионосферу, которые оказывают влияние на параметры сигналов в зависимости от длины волны РСА. Это влияние в общем случае включает в себя затухание радиоволн, фазовое запаздывание, поворот плоскости поляризации (эффект Фарадея в ионосфере), а также появление отражений от метеообразований в атмосфере. Эти явления могут вносить деструктивное влияние на получение (синтез) радиолокационного изображения (РЛИ), а могут создавать на РЛИ образы, вызванные отражением от метеорологических объектов с интенсивным отражением, маскирующих наземные (надводные) объекты, которые являются объектами радиолокационного наблюдения. В любом случае, изображения таких метеообразований (грозовая облачность, дождь, снег) должны быть идентифицированы при дешифрировании РЛИ.

Земная атмосфера является неоднородной средой с пространственной и временной зависимостью, обладающей поглощающими, преломляющими и отражающими свойствами, а ее верхний слой – ионосферная плазма обладает дисперсными и анизотропными свойствами [13–15, 115, 128, 390, 523, 543]. *Распространение радиоволн* в такой среде *сопровождается следующими физическими процессами в тропосфере и ионосфере:*

- преломлением радиоволн в тропосфере, обусловленным регулярным изменением диэлектрической постоянной по высоте и флуктуациями из-за турбулентностей. Эти явления вызывают увеличение задержки и фазы принимаемого сигнала, а также искривление пути распространения сигнала;
- поглощением радиоволн в газах тропосферы, в осадках типа дождя, тумана и др.;
- отражением от локальных неоднородностей атмосферы, грозных облаков, дождя и метеообразований;
- поглощением, а также изменением времени задержки и фазы, обусловленными конечной проводимостью ионосферы из-за наличия свободных электронов;
- изменением поляризации волны в анизотропной ионосфере (эффект Фарадея);
- дисперсными свойствами, вызванными резко выраженной частотной зависимостью воздействия параметров ионосферы на характеристики распространяющихся сигналов.

Влияние атмосферных нестабильностей на характеристики сигналов в космических РСА различно на сантиметровых, дециметровых и метровых волнах [128]. В сантиметровых диапазонах волн наиболее ощутимы пространственные нестабильности, вызванные турбулентностью тропосферы, а в дециметровом диапазоне – ионосферы. Временные изменения состояния тропосферы и ионосферы, проявляющиеся при записи сигналов по апертуре синтезированной антенны, можно отнести к пространственным флуктуациям и оценивать общее деструктивное действие обо-



их факторов. Оно проявляется в виде флуктуаций фазы принятого сигнала вдоль синтезированной апертуры, которые приводят к расфокусировке РЛИ.

Дисперсные свойства ионосферы также вызывают расфокусировку при сжатии широкополосных сигналов по дальности (обычно с ЛЧМ-модуляцией) или эквивалентному растяжению коротких импульсов (например, в видеоимпульсных РСА).

В [128, 189, 390] исследовано влияние атмосферных флуктуаций на разрешающую способность РСА космического базирования. Дисперсия фазы по длине синтезированной апертуры описывается степенной структурной функцией

$$D\{\varphi\} = B^{5/3} L_a^{5/3}, \quad (2.1)$$

$$B^{5/3} = K_x^2 \frac{4 \cdot 2,91}{H_s^{5/3} \cos \gamma_i} [I_t + I_i]. \quad (2.2)$$

Здесь  $K_x = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $H_s$  – высота орбиты КА;  $\gamma_i$  – угол падения, отсчитываемый от местной вертикали в точке наблюдения;  $I_t$  и  $I_i$  – интегралы по текущей высоте  $h$  над поверхностью Земли (индексы  $t$  и  $i$  для тропосферы и ионосферы соответственно).

Для тропосферы величина интеграла  $I_t$  не зависит от длины волны и по данным [17, 189] в зависимости от геофизических условий составляет

$$I_t = \int C_n^2(h) h^{5/3} dh, \quad (2.3)$$

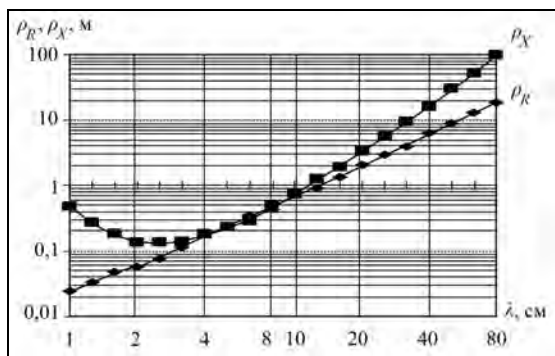
где  $C_n^2(h)$  – структурная характеристика тропосферной турбулентности.

Для параболической модели высотного профиля электронной концентрации с максимальным объемным содержанием электронов в слое  $N_{\max} = 10^6 \text{ см}^{-3}$ , зависимость от длины волны  $\lambda$  описывается формулой [128]

$$I_i = I_{i0} \lambda^4 = 5,02 \cdot 10^{-3} \lambda^4 \text{ см}^2, \quad (2.4)$$

где  $I_{i0}$  – значение  $I_i$  для  $\lambda = 1 \text{ см}$ .

На рис. 2.3 приведены зависимости предельно достижимого разрешения по азимуту и дальности от длины волны РСА без применения методов автофокусировки



**Рис. 2.3.** Зависимость достижимого разрешения по азимуту  $\rho_x$  и наклонной дальности  $\rho_R$  от длины волны РСА [128]

при синтезе РЛИ (условия зондирования:  $I_t = 3 \text{ см}^2$ ,  $I_{i0} = 13 \cdot 10^{-23} \text{ см}^{-3}$ ,  $\gamma_i = 60^\circ$  [128]). Как видно из рисунка, в коротковолновой области преобладает влияние фазовых флуктуаций тропосферы, разрешение по азимуту с ростом длины волны слабо уменьшается до долей метра. На более длинных волнах преобладает влияние ионосферы и значение минимального разрешения по азимуту может ухудшиться до сотен метров, а по дальности – превысить 100 м.

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

Особенно драматическая ситуация имеет место при радиолокационном зондировании из космоса в УКВ-диапазоне (метровые волны), где деструктивное действие ионосферных нестабильностей значительно возрастает.

Детальный анализ влияния атмосферных нестабильностей на разрешающую способность РСА космического базирования с конкретными параметрам приведен в разделе 6.10, посвященном методам автофокусировки РЛИ.

В настоящее время для преодоления расфокусировки РЛИ, вызванной атмосферными нестабильностями, используют методы:

1) измерения параметров ионосферы в районах съемки с применением наземных датчиков, использующих сигналы от спутников GPS [15] и встроенных бортовых датчиков (применительно к РСА  $L$ -диапазона волн [399, 488]);

2) автофокусировки по азимуту при синтезе апертуры, изложенные в разд. 6.10;

3) двухмерной автофокусировки РЛИ по азимуту и дальности для компенсации фазовых искажений в трансionoсферных РСА, предназначенных для дистанционного зондирования Земли в УКВ-диапазоне волн [241\*].

Из других явлений, связанных с прохождением радиоволн через атмосферу (тропосферу и ионосферу), следует отметить потери на распространение сигнала и отражение от гидрометеоров в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн.

На рис. 2.4 дана иллюстрация этих явлений и приведена зависимость пропускной способности атмосферы от длины волны РСА.

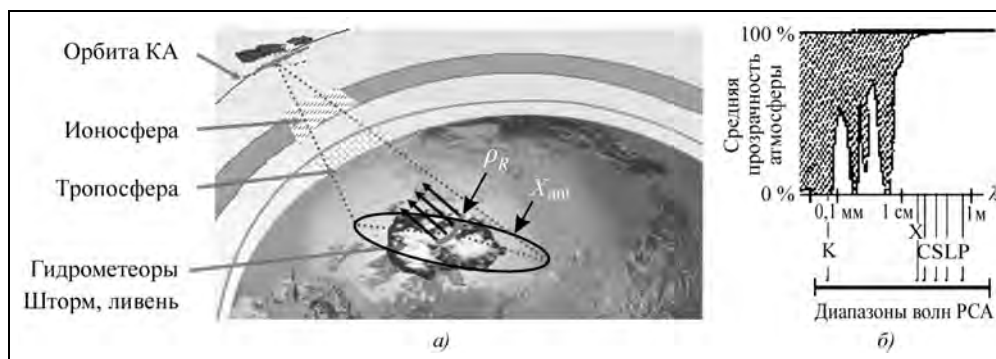


Рис. 2.4. Трасса прохождения радиосигналов через атмосферу при радиолокационном зондировании Земли:

*a* – отражение от гидрометеоров; *б* – зависимость прозрачности атмосферы от диапазона волн [189]

В качестве примера отметим, что при радиолокационном зондировании океана с помощью космического РБО «Космос-1500», работающего в  $X$ -диапазоне волн, кроме получения данных о состоянии морской поверхности, приводном ветре и циклонах можно было вести изучение процессов образования облаков и осадков в тропических районах.

В ходе эксплуатации РБО системы Морской космической разведки и целеуказания, выполняющей задачу контроля надводной обстановки, было установлено, что в  $X$ -диапазоне волн возможно сильное отражение от гидрометеоров, особенно

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

на экваториальных широтах, резко снижающих вероятность обнаружения кораблей и подстилающей поверхности.

Отраженный сигнал, создаваемый гидрометеообразованиями (ГМО), формируется объемным отражением от облаков и осадков (дожди, град, снегопад). Из-за движения элементарных отражателей в этих образованиях интервал корреляции принимаемого от них сигнала не превышает 10 мс [193]. При этом реализуется сжатие сигналов по дальности, но при синтезе РЛИ по азимуту ГМО отображаются как дополнительный шум. Следует учесть, что при наблюдении протяженной поверхности в РСА сжатие сигнала по азимуту (или дальности) не приводит к изменению отношения сигнал/шум. Оно остается равным  $\sigma^0/\sigma_{\text{не}}^0$  на входе приемника и после синтеза РЛИ. Удельную ЭПР ГМО  $\sigma_{\text{гмо}}^0$  можно вычислить через суммарную ЭПР ГМО  $\sigma_{\text{гмо}}$ , равную объемному рассеянию ГМО  $\eta$ , умноженному на импульсный объем сигнала от ГМО  $v_{\text{гмо}}$ , путем деления ее на облучаемую площадь в элементе разрешения по горизонтальной дальности:

$$\sigma_{\text{гмо}}^0 = \frac{v_{\text{гмо}}}{\rho_Y X_{\text{ant}}} \eta = (H_{\text{гмо}} \eta) = H_{\text{гмо}} \left( \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 Z \right), \quad (2.5)$$

где  $v_{\text{гмо}}$  – объем области, формирующей сигнал от ГМО;  $\rho_Y$  – разрешение по горизонтальной дальности;  $X_{\text{ant}}$  – зона облучения антенны по азимуту;  $\eta$  – радиолокационная отражательная способность ГМО – его ЭПР в единице объема (см. [214], гл. 6);  $K$  – комплексный коэффициент, зависящий от комплексной диэлектрической проницаемости водной среды ( $|K|^2 \approx 1$  для воды и  $|K|^2 \approx 0,197$  для снега/льда);  $Z$  ( $\text{мм}^6/\text{м}^3$ ) – множитель отражения, равный  $Z \approx 1000r^{1,6}$  для слабых дождей или снегопада с интенсивностью  $r$  от 4 до 30 мм/ч и  $Z \approx 200r^{1,6}$  для интенсивных осадков (грозы, ливни) с  $r = 50 \dots 120$  мм/ч.

Импульсный объем ГМО  $v_{\text{гмо}} = \rho_R X_{\text{ant}} H_{\text{гмо}} / \sin \gamma_i$  равен произведению разрешения по наклонной дальности  $\rho_R$ , размера зоны облучения антенны по азимуту (ширина эллипса на рис. 2.4, а) и длины дальностной трубки шириной  $\rho_R$  в пределах высоты ГМО  $H_{\text{гмо}} / \sin \gamma_i$ , где  $H_{\text{гмо}}$  – высота ГМО;  $\gamma_i$  – угол падения, определяющий поперечное сечение гидрометеора (длину дуги  $\rho_R$  на рис. 2.4,а).

Значения удельной ЭПР  $\sigma_{\text{гмо}}^0$  дождя с интенсивностью  $r = 50$  мм/ч при высоте  $H_{\text{гмо}} = 1$  км и угле падения  $\gamma_i = 45^\circ$  в зависимости от длины волны РЛС составляют:

Длина волны $\lambda$ , см .....	3	5,6	10	23
УЭПР $\sigma_{\text{гмо}}^0$ , дБ .....	-14	-25	-35	-49

Приведенные данные показывают, что при зондировании в дециметровых диапазонах волн, отражение от гидрометеоров существенно падает.

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

Пример наблюдения гидрометеора с помощью РСА высокого разрешения приведен на рис. 2.5, где показан снимок р. Волги в районе г. Волгограда, полученный с помощью РСА TerraSAR-X (Infoterra GmbH©) [530] с разрешением около 3 м. Отражение от грозового облака на 5,5 дБ превышает отражение от поля с заметным маскирующим действием, не позволяющим обнаружить наземные объекты в области большой плотности изображения облака. По данным синоптиков в районе съемки в это время наблюдались грозовая облачность и дождь.

Принципиально РСА могут применяться для зондирования облачности и атмосферных осадков и иметь близкие к РБО характеристики, если использовать в РСА режим некогерентной обработки или синтез РЛИ на интервале когерентности сигнала до 10 мс (см. главу 13, РБО «Космос-1500» и РСА «Северянин»).



**Рис. 2.5.** Фрагмент радиолокационного снимка р. Волги в районе г. Волгограда в X-диапазоне волн с отражением от грозового облака (в левой части): РСА TerraSAR-X, режим высокого разрешения, 20070621\_TSX\_First\_Image\_Wolga\_hig\_res.tif. Infoterra GmbH© [530]

### 2.3. Поляризация радиосигналов при передаче и приеме

В практике радиолокационного ДЗЗ используют зондирующие сигналы с разной поляризацией при передаче (горизонтальной или вертикальной, реже круговой). В однополяризационных РСА прием ведут с согласованными вертикальной (ВВ), горизонтальной (ГГ) или круговой поляризациями. В поляриметрических РСА используют два приемных канала с горизонтальной и вертикальной поляризациями, позволяющих сравнивать сигналы с любыми комбинациями поляризаций при передаче и приеме (режимы ВВ, ВГ, ГГ, ГВ или VV, VH, HH, HV). Поляризация излучения определяется направлением вектора электрического поля  $\mathbf{E}$  в плоскости, нормальной направлению распространения радиоволны. При горизонтальной поляризации излучения вектор  $\mathbf{E}_H$  электрического поля параллелен наблюдаемой поверхности. При вертикальной поляризации вектор излучения  $\mathbf{E}_V$  направлен под углом падения  $\chi$  к местной вертикали.

Заметим, что объекты простой формы (сфера, трехгранный уголкообразный отражатель) дают отраженный сигнал только при согласованных поляризациях излучения и приема (ГГ или ВВ). Линейные вертикальные объекты (например, металлические или железобетонные столбы) дают слабое отражение при горизонтальной

поляризации ГГ. Горизонтальные линейные объекты (провода, рельсы) могут давать интенсивное отражение при ГГ-поляризации, если они параллельны вектору **Е**. Линейные вертикальные объекты, а также горизонтальные, направленные от РЛС, дают отражение при ВВ. Сложные объемные и линейные объекты при произвольных направлениях дают отражения в любых комбинациях поляризаций, причем при отсутствии искажающих воздействий (например, ионосферы) комбинации ВГ и ГВ одинаковы.

При поляриметрических измерениях кроме амплитудных соотношений имеется возможность по комплексному сигналу измерить разность фаз между сигналами комбинаций поляризаций ВВ и ВГ, ГГ и ГВ или ВВ и ГГ. Можно также вычислить полную поляризационную матрицу (матрицу Стокса), которая описывает преобразование амплитуды, фазы и поляризации волны, облучающей цель

$$S = \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_{HH}} e^{j\varphi_{HH}} & \sqrt{\sigma_{HV}} e^{j\varphi_{HV}} \\ \sqrt{\sigma_{VH}} e^{j\varphi_{VH}} & \sqrt{\sigma_{VV}} e^{j\varphi_{VV}} \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

где  $\sqrt{\sigma_{HH}}$ ,  $\sqrt{\sigma_{HV}}$ ,  $\sqrt{\sigma_{VH}}$ ,  $\sqrt{\sigma_{VV}}$  – элементы матрицы рассеяния, характеризующие амплитуду отраженного сигнала;  $\varphi_{HH}$ ,  $\varphi_{HV}$ ,  $\varphi_{VH}$ ,  $\varphi_{VV}$  – соответствующие фазы.

В поляриметрических РСА обычно используют либо режим двух поляризаций – одна на передачу (В или Г) и две – на прием (В+Г), либо полнополяриметрический режим четырех поляризаций, при котором на излучение поочередно переключают поляризацию в соседних зондированиях с двухканальным приемом отраженных сигналов обеих поляризаций. При этом частота повторения удваивается, что вызывает определенные сложности с обеспечением однозначности сигналов (см. раздел 3.6). Аналогичным образом реализуется и режим двух поляризаций в комбинации ВВ+ГГ.

Кроме режима с линейными поляризациями на излучение, возможна работа с круговой поляризацией, при которой путем соответствующего построения антенного тракта одновременно излучаются зондирующие сигналы обеих поляризаций, но с разностью фаз  $90^\circ$  между ними. В зависимости от знака разности фаз вектор электрического поля получает вращение по или против часовой стрелки. Прием отраженных сигналов обычно ведут с помощью двухканального приемника, как в случае работы с линейными поляризациями, а необходимую разность фаз для получения круговой поляризации вводят после синтеза комплексных изображений. При этом возможно получение РЛИ с совпадающим направлением вращения и с обратным направлением вращения плоскости поляризации. Применение режима с круговой поляризацией может быть полезно в низкочастотном *Р*-диапазоне волн, в котором при прохождении радиоволн через ионосферу возможен поворот плоскости поляризации вектора электрического поля (эффект Фарадея). Сравнение выходных РЛИ с согласованным и противоположным направлениями вращения аналогично сравнению ВВ- и ВГ- или ГГ- и ГВ-поляризаций при работе с линейными поляризациями.

Упрощенные режимы, близкие по возможностям к полнополяриметрическому режиму, рассмотрены в подразделе 4.1.4.

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

Мощность сигнала, попадающего в приемную антенну РЛС для данного типа подстилающей поверхности, зависит от поляризации излучения и от взаимного направления поляризации при излучении и приеме. Если поляризации излучения и приема совпадают, то для большинства поверхностей (пашня, покрытая растительностью местность) уровни отраженного сигнала для горизонтальной и вертикальной поляризации близки. Исключения составляют гладкие поверхности (бетон, асфальт, гравий, спокойная водная поверхность). Для них, особенно в длинноволновом диапазоне (3 см и более), отраженный сигнал при горизонтальной поляризации меньше, чем при вертикальной (до 16 дБ при больших углах падения).

Влияние поляризации сказывается на подчеркивании контрастов объектов, протяженных по длине в направлении, совпадающем с направлением поляризации. Так, при вертикальной поляризации возрастает сигнал от объектов, протяженных по высоте – опоры линий электропередач, деревья (особенно ель), морские волны и т.д. При горизонтальной поляризации могут дать интенсивный сигнал провода линий электропередач или железнодорожные рельсы при соответствующем ракурсе, деревья с вытянутой горизонтально кроной. В частности это явление позволяет на радиолокационных снимках различать лиственные и хвойные породы леса.

В общем случае коэффициент рассеяния земной и водной поверхности при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной и перекрестной. Особенно сильно это различие проявляется при малых углах наклона (локальных углах скольжения) и при гладких поверхностях. При малых углах наклона значение  $\sigma^0$  морской поверхности для ВВ может быть на 22 дБ выше, чем при ГГ в случае спокойного моря. Эта разность постепенно уменьшается с увеличением волнения морской поверхности и угла наклона уменьшением угла падения и практически исчезает при скоростях ветра 28...37 км/ч и углах наклона от 60 до 90°.

Влияние выбора поляризации показано на рис. 2.6, где представлены два РЛИ (ГГ- и ГВ-поляризации) морской поверхности с рыболовными судами при сильном волнении моря (скорость ветра 9 м/с). Из-за сильного отражения от морской поверхности, близкого по уровню к отражению от суши, суда обнаруживаются только на перекрестной ГВ-поляризации.

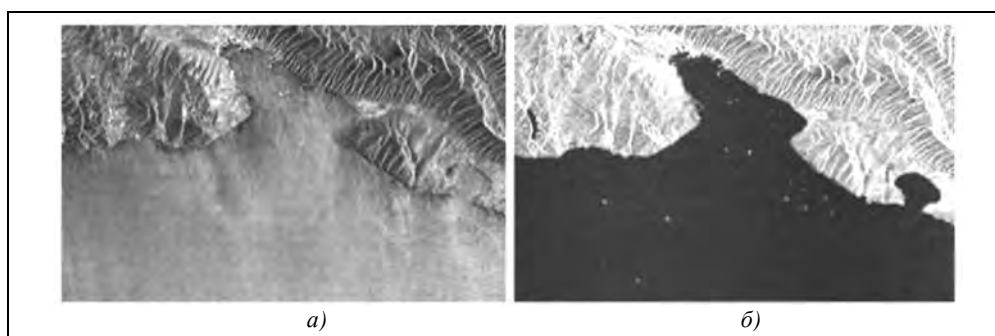


Рис. 2.6. Фрагменты РЛИ с рыболовными судами при сильном волнении моря:  
а – ГГ-поляризации; б – ГВ-поляризации; С-диапазон волн  
(Черное море в районе Новороссийска, PCA ASAR KA Envisat [378])

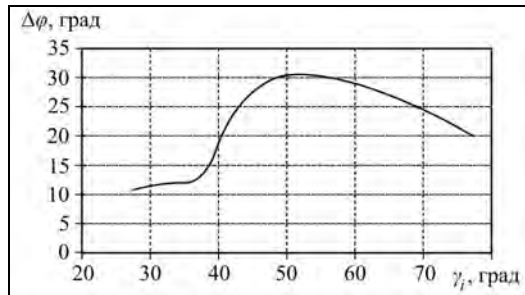


Рис. 2.7. Зависимость разности фаз ВВ- и ГГ-поляризаций для леса в L-диапазоне

При работе с различными поляризациями информативными признаками являются отношения ЭПР в поляризационных каналах (например,  $\sigma_{\text{HV}}^0/\sigma_{\text{HH}}^0$  или  $\sigma_{\text{HH}}^0/\sigma_{\text{VV}}^0$ ), отношение ЭПР поляризационной составляющей к усредненной ЭПР  $\sigma_{\text{mean}}^0 = (\sigma_{\text{HH}}^0 + \sigma_{\text{VV}}^0 + 2 \times \sigma_{\text{VH}}^0)/4$  или же разность фаз между ВВ- и ГГ- либо между согласованной поляризацией и кроссполяризацией. Фазовую информацию иллюстрирует рис. 2.7, где приведена зависимость от угла падения разности фаз вертикальной и горизонтальной составляющих в L-диапазоне для леса.

Как правило, для кроссполяризации отраженный сигнал меньше, чем для согласованной, особенно для гладких поверхностей, причем подчеркиваются контрасты различных поверхностных особенностей (вид дороги, участки лавы, осадочных пород и т.д.). Для растительного покрова разница не превышает 0,75 дБ [193].

## 2.4. Отражение электромагнитных волн от сосредоточенных и протяженных объектов и численные характеристики отраженных сигналов

### 2.4.1. ЭПР и диаграммы обратного рассеяния простых объектов

Мощность сигнала в приемном тракте в соответствии с уравнением дальности (см. раздел 3.4) определяются величиной эффективной площади рассеяния (ЭПР) объекта (радиолокационной цели). ЭПР является количественной мерой отношения плотности потока мощности сигнала, рассеянного в направлении приемника, к мощности потока СВЧ электромагнитных волн, падающих на цель при заданной поляризации передающей антенны. ЭПР

$$\sigma = 4\pi \frac{P_s}{W_1} \text{ м}^2, \quad (2.7)$$

где  $P_s$ , Вт – мощность сигнала, отраженного от цели в направлении приемника РЛС в единице телесного угла;  $W_1$ , Вт/м<sup>2</sup> – плотность потока мощности, облучающего цель.

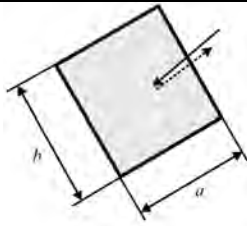
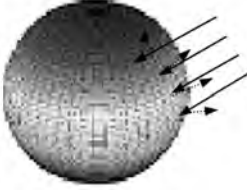
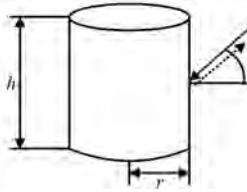
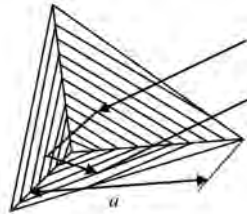
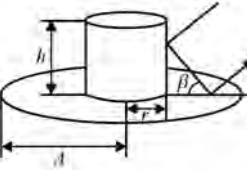
Следует отметить, что реальные объекты при облучении их под разными углами могут дать различную мощность отражения. Это вызывает флуктуации принимаемого сигнала. Тогда говорят о средней ЭПР и об уровнях её флуктуаций.

По методу определения ЭПР радиолокационные цели удобно разделять на простые (элементарные) и сложные. К элементарным относятся простейшие геометрические конструкции: металлические плоская пластина, сфера, цилиндр, угловой отражатель и др. Их ЭПР и зависимости диаграммы обратного рассеяния (ДОР) от размеров, длины волны РЛС, углов наблюдения могут быть вычислены

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

по формулам (в случае, когда их размеры существенно больше длины волны). ЭПР и ДОР для основных типов простых объектов приведены в табл. 2.2. Заметим, что ЭПР этих объектов на перекрестных поляризациях ГВ или ВГ близка к нулю (определяется краевыми явлениями).

Таблица. 2.2. Характеристики ЭПР и ДОР для простых объектов

Объект	Геометрия отражения	Формулы для ЭПР и ДОР	
Плоская пластина $a \times b$		$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$ $G(\alpha) = \frac{\sin[\pi\alpha(a/\lambda)]}{\pi\alpha(a/\lambda)}$ $G(\beta) = \frac{\sin[\pi\beta(b/\lambda)]}{\pi\beta(b/\lambda)}$	(2.8)
Сфера с радиусом $r \gg \lambda$		$\sigma = \pi r^2$	(2.9)
Цилиндр вертикальный радиусом $r$ , высотой $h$ при ВВ		$\sigma = \frac{2\pi h^2 r}{\lambda}$	(2.10)
Цилиндр вертикальный радиусом $r$ , высотой $h$ при ГГ		$G(\alpha) = \sigma \frac{\sin(K_x h \sin \alpha)}{K_x h \sin \alpha}$ $K_x = 2\pi/\lambda$	(2.11)
Трехгранный уголкового отражатель, длина грани $a$		$\sigma = \frac{4}{3} \pi \frac{a^4}{\lambda^2}$	(2.12)
Отражатель диск – цилиндр «шляпа» (Top-hat reflector [274, 358])		$\sigma = \frac{2\pi r h^2 \cos \beta}{\lambda}$ $G(\beta) = \sigma \frac{\sin(K_x h \sin \beta)}{K_x h \sin \beta}$	(2.13)
	$A \geq r + \frac{h}{\operatorname{tg} \beta}$	ДОР по азимуту – равномерная 0...360° круговая	



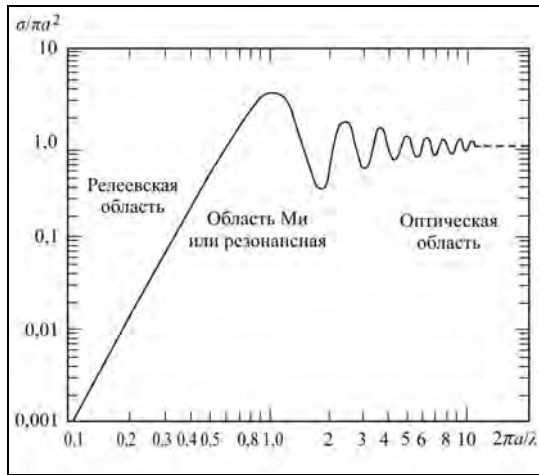


Рис. 2.8. ЭПР сферы [214]

ЭПР металлической сферы с диаметром, много большим длины волны (оптическая область), равна площади поперечного сечения сферы согласно (2.9). При уменьшении радиуса сферы появляется резонансная колебательная область Ми, а при  $r \ll \lambda$  – область Релея, в которой ЭПР сферы изменяется обратно пропорционально четвертой степени длины волны (см. рис. 2.8).

Из элементарных целей наиболее важны уголкового отражатели, которые могут служить радиолокационными ориентирами и эталонными объектами для измерения

разрешающей способности РЛС и калибровки чувствительности её тракта. С этой целью оборудуются специальные измерительные полигоны.

#### 2.4.2. Отражение радиоволн от сложных объектов

К сложным целям относится большинство реальных объектов. Их эффективная площадь рассеяния может быть определена экспериментально или математическими методами электродинамических расчетов. Как правило, ЭПР сложных объектов задают статистически, так как отраженный ими сигнал меняется при малейшем случайном перемещении элементов их конструкций относительно РЛС. Сложные цели могут рассматриваться как точечные, групповые и распределенные.

*Точечные цели* – цели, линейные и угловые размеры которых значительно меньше элемента разрешения РЛС на местности. Обычно это малоразмерные объекты (опоры линий электропередач, мелкие суда на воде, автомашины и т.д.), наблюдаемые в режимах низкого разрешения РСА – обзорных или широкозахватных.

*Групповые цели* соизмеримы с элементом разрешения РЛС или занимают несколько элементов: здания, крупные корабли, мосты, либо объекты техники, наблюдаемые в детальных режимах высокого пространственного разрешения РСА (~1 м).

*Распределенные цели* (площадные, линейные) занимают много элементов разрешения и обычно характеризуются однородностью статистического распределения. К ним относятся, например, сельскохозяйственные угодья, лесные массивы, взволнованная морская поверхности, а также крупные неоднородности (аномалии) на равномерной поверхности (кильватерные следы, пятна загрязнений и др.).

В табл. 2.3 приведены ориентировочные значения ЭПР для ряда сложных объектов. В табл. 2.4 приведены значения ЭПР для средств воздушного нападения с учетом ракурса наблюдения. Следует иметь в виду, что при радиолокационном наблюдении самолетов на земле при углах падения  $\sim 45^\circ$  значения ЭПР ближе к указанным для бортовых ракурсов, чем для случаев при наблюдения в нос или хвост.

**Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения**

**Таблица 2.3. Средние ориентировочные значения ЭПР объектов [33\*, 118]**

Объект	Размеры, м×м	$\sigma, \text{м}^2$	
		$\lambda = 3 \text{ см}$	$\lambda = 70 \text{ см}$
Человек	0,7×2,0	0,5	1,0
Автомобиль, тягач	7,0×4,0	5,0...15,0	20,0
Танк, БМП	7,0×4,0	4,0...20,0	15,0
Истребитель на стоянке	12,0×17,0	3,0...15,0	10,0
Бомбардировщик на стоянке	50,0×40,0	10,0...100,0	100,0

**Таблица 2.4. Значения ЭПР средств воздушного нападения с учетом ракурса наблюдения [33\*]**

Объект	Ракурс, град	$\sigma, \text{м}^2$		
		$\lambda = 3 \text{ см}$	$\lambda = 10 \text{ см}$	$\lambda = 40 \text{ см}$
Стратегическая авиация: обычный / Стелс	±45 (нос)	70 / 0,3...3	75 / 0,3...5	60 / 0,5...10
	±45 (борт)	80 / 1...30	70 / 1...30	60 / 1...40
	±45 (хвост)	1000 / 0,5...10	120 / 0,5...10	90 / 0,5...20
Тактическая авиация: обычный / Стелс	±45 (нос)	4 / 0,1...0,5	4 / 0,1...0,5	6 / 0,2...0,7
	±45 (борт)	5 / 0,5...0,7	6 / 0,5...0,7	9 / 0,5...0,7
	±45 (хвост)	5 / 0,2	5 / 0,2...0,1	8 / 0,2...0,4
Армейская авиация	±45 (нос)	5...13	6...13	7...12
	±45 (борт)	9...30	10...30	10...12
	±45 (хвост)	3...10	6...10	7...10
Авиация ВМС	±45 (нос)	4...9	4...12	6...7
	±45 (борт)	6...16	6...23	9...14
	±45 (хвост)	4...5	6...13	5...7
Военно-транспортные самолеты	±45 (нос)	90...250	90...300	100...400
	±45 (борт)	1000...350	100...350	150...400
	±45 (хвост)	80...200	80...250	80...350
Самолеты ДРЛО и У Е-3С / Е-2С	±45 (нос)	50 / 18	50 / 20	50 / 20
	±45 (борт)	80 / 35	70 / 35	70 / 40
	±45 (хвост)	100 / 15	80 / 18	70 / 15
БЛА	±45 (нос)	0,05	0,05	0,20
	±45 (борт)	0,30	0,40	0,50
	±45 (хвост)	0,20	0,20	0,30

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

В табл. 2.5 дана сводка усредненных данных по ЭПР морских целей в  $X$ -диапазоне волн. С увеличением длины волны ЭПР уменьшается в соответствии с приведенными ниже коэффициентами:

Диапазон волн .....	$X$	$S$	$L$	$P$
Коэффициент пересчета ЭПР .....	1,0	0,8	0,4	0,2

**Таблица 2.5. Значения ЭПР морских целей в  $X$ -диапазоне волн [33\*]**

Морские цели	Длина, м	Ширина, м	ЭПР с носа, м <sup>2</sup>	ЭПР с борта, м <sup>2</sup>
Авианосец типа Нимиц	332,8	78,4	$4 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$
Крейсер типа Тикондерога	171,7	16,8	$6 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^5$
Фрегат типа Перри	135,6	13,7	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$
Катер Пегас	40,5	8,6	180	1800
Подводная лодка, всплывшая	до 172	до 23	~10	~200

Экспериментальные оценки ЭПР морских целей в  $S$ -диапазоне волн, полученные в ходе эксплуатации РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1», приведены в подразделе 9.3.4 (табл. 9.1).

### 2.4.3. Отражение радиоволн от пространственно распределенных объектов

Пространственно распределенные объекты имеют однородную отражающую способность в пределах некоторого участка: луга, поля, леса, взволнованная водная поверхность, ледовые поля, дороги, просеки и т.д. Если ширина объекта меньше разрешения РЛС, то говорят о линейно-протяженных объектах (провода, ограждения, межи и др.).

Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка облученной поверхности рассеивает сигналы во всех направлениях с одинаковой амплитудой. Интегральный отраженный сигнал определяется векторной суммой отражений от отдельных мелкошероховатых пластин (фацетов). Можно рассматривать несколько основных типовых случаев формирования отраженного сигнала от земных покровов: гладкая поверхность; поверхность с пологими неровностями; поверхность с крупной шероховатостью; слоистая среда; двухгранные углы; морская поверхность; сельскохозяйственные угодья; лесные массивы.

Отражающую способность подстилающей поверхности характеризуют коэффициентом рассеяния, представляющим собой *удельную эффективную площадь рассеяния* (УЭПР) – отношение ЭПР элемента разрешения на местности к значению его геометрической площади:

$$\sigma^0 = \sigma / [\rho_x \rho_y], \quad (2.14)$$

где  $\rho_x, \rho_y$  – линейное разрешение РЛС по координатам на местности вдоль и поперек линии пути.

В режиме бокового обзора оно соответствует геометрии получаемого РЛИ, а при скошенном обзоре РЛИ преобразуют к прямоугольным координатам с отсчетами по азимуту, соответствующими нулю доплеровской частоты.

Обычно УЭПР выражают в децибелах:

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

$$\sigma_{\text{dB}}^0 = 10 \lg \sigma^0. \quad (2.15)$$

При падении радиоволны на наблюдаемую поверхность принципиально можно рассматривать следующие составляющие, представленные на рис. 2.9: падающую волну  $E_0$ , зеркально отраженную волну  $E_3$ , волну, обратно отраженную в сторону источника облучения  $E_1$ , и волны, отраженные в разные стороны  $E_2$ , в том числе и под углом к плоскости падающей волны.

Применительно к обычной однопозиционной радиолокации интерес представляет только волна  $E_1$ , отраженная обратно к источнику. Для бистатистических и многопозиционных радиолокационных систем должны рассматриваться все отраженные компоненты.

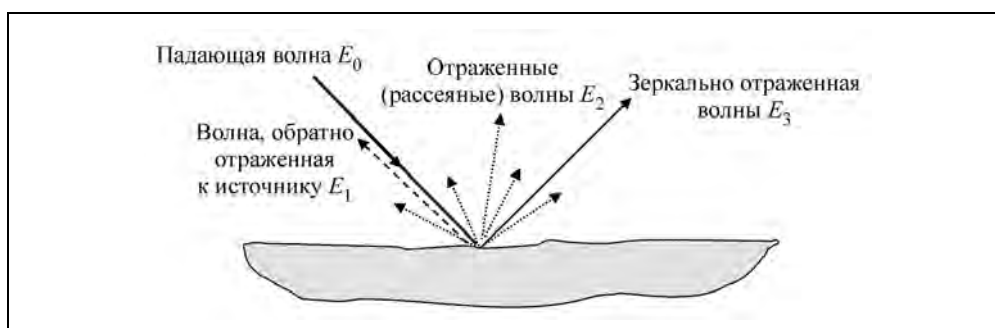


Рис. 2.9. Виды отраженных волн

Характер отражения зависит от шероховатости поверхности. Ее характеризуют величиной *неровности*  $\sigma_h$  – среднеквадратическим отклонением от идеальной плоскости. Если величина *неровностей* мала по сравнению с длиной волны РЛС (удовлетворяется условие Релея), то поверхность может рассматриваться как гладкая

$$\sigma_h \leq \frac{\lambda}{16 \cos \gamma_i}, \quad (2.16)$$

где  $\lambda$  – длина волны РЛС;  $\gamma_i$  – угол падения от местной вертикали.

В общем случае следует рассматривать прохождение электромагнитных волн на границах сред с разными значениями диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости, когда происходит направленное (зеркальное) отражение, рассеяние радиоволн, а также их преломление в другую среду.

Особый случай поверхности с малой шероховатостью (пологой *неровностью*) – когда *неравномерность* имеет волнообразный характер. К ней относятся морская поверхность с *рябью*, а также песчаные пустыни с *барханами*. Общими свойствами для них является связь отражающей способности с величиной *неравномерности*, а различие состоит в том, что морская поверхность является динамическим объектом, отраженный сигнал от которого имеет малый временной интервал корреляции. Иногда пренебрегают этим фактором и рассматривают «замороженную» морскую поверхность в виде «стиральной доски». Поэтому, при дальнейшем анализе отдельно рассматриваются модели рассеяния от волнообразной шероховатости и

отдельно отражение от морской поверхности с учетом ветровых воздействий, сейсмических явлений, проявления внутренних волн и т.д.

Определенные различия характерны для растительных покровов разных типов. Для сельскохозяйственных угодий основное отражение формируется зеленой массой. Для отдельных культур (кукуруза, подсолнечник) могут иметь место резонансные явления. Для лесных массивов в зависимости от диапазона волн изменяется доля энергии, отраженная лиственной массой, ветками и стволами, а также почвой и подпочвенным слоем.

## 2.5. Отражение радиоволн от плоской границы двух сред

Имеет большие перспективы многочастотное радиолокационное зондирование земных покровов со слоистой структурой. Механизмы прохождения радиоволн через среды с различными радиофизическими свойствами имеют свои особенности, что требует специального рассмотрения. В первую очередь это касается процесса взаимодействия электромагнитных колебаний на границе двух сред. Основными параметрами, определяющими волновые процессы в среде, являются скорость распространения и затухание, которые зависят от электрических параметров среды – диэлектрической и магнитной проницаемости [17, 91, 245]. Скорость света в свободном пространстве  $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ , длина волны РЛС  $\lambda = c/f$ , где значения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м (А·с/В·м) и магнитной проницаемости  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (В·с/А·м).

Физические среды характеризуются *относительной диэлектрической проницаемостью*  $\varepsilon$ , которая при наличии потерь имеет комплексное значение  $\dot{\varepsilon}$ , и *относительной магнитной проницаемостью*  $\mu$ . Для вакуума  $\varepsilon=1$  и  $\mu=1$ . Потери при распространении радиоволн в среде характеризуют *тангенсом угла потерь*, который является отношением мнимой  $\varepsilon'$  и действительной  $\varepsilon''$  частей диэлектрической проницаемости

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon' / \varepsilon'' . \quad (2.17)$$

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость среды выражается формулой

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon - j 4\pi\sigma / \omega = \varepsilon (1 - j \operatorname{tg} \delta) , \quad (2.18)$$

где  $\omega=2\pi f_s$  – круговая частота колебаний;  $\sigma$  – потери в среде.

Комплексное волновое число

$$\dot{k} = \omega \sqrt{\dot{\varepsilon}_s \mu_0 \varepsilon_0} = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\dot{\varepsilon}_s} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\varepsilon}_s} , \quad (2.19)$$

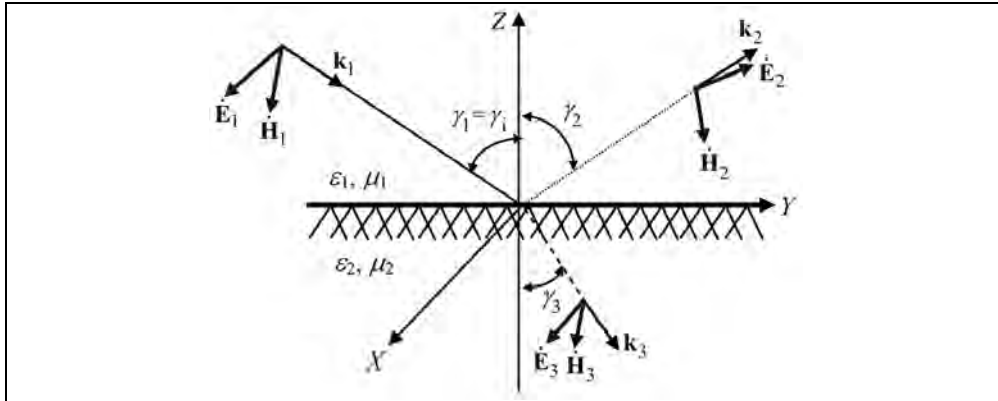
где  $c$  и  $\lambda$  – скорость света и длина радиоволны в свободном пространстве соответственно.

Большинство природных сред близки к диэлектрикам и имеют магнитную проницаемость, мало отличающуюся от единицы  $\mu \approx 1$ . Поэтому скорость распространения радиоволн в среде приблизительно равна

**Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения**

$$c_s \approx c/\sqrt{\varepsilon} . \quad (2.20)$$

На рис. 2.10 показана геометрия взаимодействия электромагнитных колебаний с границей двух сред с характеристиками комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  и магнитной проницаемости  $\mu_1$  и  $\mu_2$  в системе координат  $XYZ$ .



**Рис. 2.10.** Геометрия взаимодействия электромагнитных колебаний с границей двух сред (падающая волна с горизонтальной поляризацией)

Параметры отраженной и преломленной волн находим из равенства граничных условий. Падающая плоская волна характеризуется комплексными векторами напряженности электрического  $\dot{\mathbf{E}}_1$  и магнитного  $\dot{\mathbf{H}}_1$  полей, волновым вектором  $\dot{\mathbf{k}}_1$  и углом падения  $\gamma_1 = \gamma_i$

$$\dot{\mathbf{E}}_1 = E_1 \mathbf{e}_0 e^{j\omega_s t - jk_1 R} , \quad (2.21)$$

где  $E_1$  – амплитуда напряженности электрического поля;  $\mathbf{e}_0$  – единичный вектор поляризации излучения;  $\omega = 2\pi f_s$  – угловая несущая частота;  $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_1}$  – волновое число;  $R$  – наклонная дальность визирования, определяющая фазу фронта падающей волны.

На рисунке показана горизонтальная поляризация облучающей волны с единичным вектором  $\mathbf{e}_{0H} = \mathbf{x}_0 1 + \mathbf{y}_0 0 + \mathbf{z}_0 0$ , где  $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0$  – единичные векторы в системе координат  $XYZ$ . Вектор  $\dot{\mathbf{E}}_1$  параллелен оси  $X$ , нормальной к плоскости распространения волны  $YZ$ . Для вертикальной поляризации вектор  $\mathbf{e}_0$  имеет вид

$$\mathbf{e}_{0V} = \mathbf{x}_0 0 + \mathbf{y}_0 \cos \gamma_i + \mathbf{z}_0 \sin \gamma_i .$$

Будем считать известной амплитуду напряженности электрического поля. Ее можно вычислить (см. формулу дальности, раздел 3.4) по излучаемой мощности  $P_t$  и коэффициенту усиления антенны РЛС  $G$

$$E_1 = \sqrt{\frac{P_t G \rho_1}{4\pi R^2}}, \quad (2.22)$$

где  $\rho_1$  – волновое сопротивление среды 1 (для свободного пространства  $\rho_0 = 120$  Ом).

Напряженность магнитного поля

$$\dot{H}_1 = \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_1}{\mu_0}} \dot{E}_1. \quad (2.23)$$

В предположении однородности среды 1 и 2 граничные условия принимают вид

$$\dot{E}_{\tau 1} = \dot{E}_{\tau 2}; \quad \dot{H}_{n1} = \dot{H}_{n2}; \quad \dot{E}_{n1} \dot{\epsilon}_1 = \dot{E}_{n2} \dot{\epsilon}_2; \quad \dot{H}_{\tau 1} = \dot{H}_{\tau 2}, \quad (2.24)$$

где индекс « $\tau$ » означает тангенциальную, индекс « $n$ » нормальную составляющую поля, а индексы «1» и «2» определяют среду, для которой берется данная составляющая.

Для случая горизонтальной поляризации падающей волны тангенциальные составляющие электрического поля при  $z = 0$  (см. рис. 2.11) должны удовлетворять следующему соотношению:

$$\dot{E}_{1Y}(Y) + \dot{E}_{2Y}(Y) = \dot{E}_{3Y}(Y)$$

или

$$E_1 e^{-jk_1 Y \sin \gamma_1 + j\phi_0} + E_2 e^{-jk_1 Y \sin \gamma_2 + j\phi_0} = E_3 e^{-jk_2 Y \sin \gamma_3 + j\phi_0}, \quad (2.25)$$

где  $\phi_0$  – фаза падающей волны при  $X=0, Z=0$ .

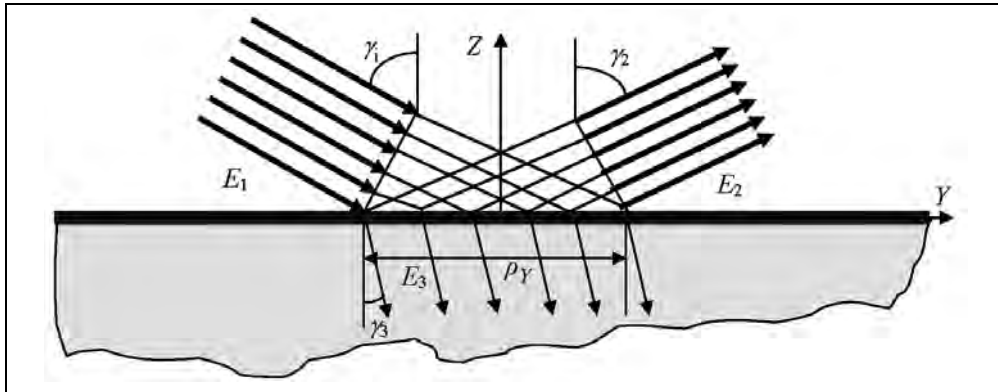


Рис. 2.11. Отражение радиоволн от плоской границы двух сред

Выполнение равенства (2.24) при любых значениях  $Y$  возможно при равенстве показателей степени:

$$\sqrt{\dot{\epsilon}_1} \sin \gamma_1 = \sqrt{\dot{\epsilon}_1} \sin \gamma_2 = \sqrt{\dot{\epsilon}_1} \sin \gamma_i = \sqrt{\dot{\epsilon}_2} \sin \gamma_3, \quad (2.26)$$

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

из чего следует, что  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ , т.е. имеет место зеркальное отражение (составляющая  $E_2$ ).

Угол преломления определяется

$$\sin \gamma_3 = \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2}} \sin \gamma_1 \quad (2.27)$$

Из (2.24) и (2.25) имеем

$$\dot{\mathbf{E}}_1 + \dot{\mathbf{E}}_2 = \dot{\mathbf{E}}_3 \quad (2.28)$$

Граничные условия для тангенциальных составляющих магнитного поля

$$\dot{H}_{1Y} + \dot{H}_{2Y} = \dot{H}_{3Y} \quad (2.29)$$

или

$$\begin{aligned} & -\sqrt{\dot{\epsilon}_1} E_1 \cos \gamma_1 e^{-jk_1 Y \sin \gamma_1 + j\varphi_0} + \sqrt{\dot{\epsilon}_1} E_2 \cos \gamma_2 e^{-jk_1 Y \sin \gamma_2 + j\varphi_0} = \\ & = -\sqrt{\dot{\epsilon}_2} E_3 \cos \gamma_3 e^{-jk_2 Y \sin \gamma_3 + j\varphi_0} \end{aligned}$$

Откуда соотношение между падающей, зеркально отраженной и преломленной составляющими

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 = \dot{E}_3 \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} - \operatorname{tg}^2 \gamma_1} \quad (2.30)$$

Из совместного решения уравнений (2.26)–(2.30) вычисляется *коэффициент зеркального отражения*, определяющий отношение комплексных амплитуд отраженного и падающего лучей на границе двух сред, известный как коэффициент Френеля. Для горизонтальной поляризации падающей волны после ряда преобразований [91]

$$\dot{K}_{\text{гн}} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_1} \cos \gamma_1 - \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \gamma_1}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_1} \cos \gamma_1 + \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \gamma_1}} \quad (2.31)$$

$$\dot{E}_3 = \dot{E}_1 (1 + \dot{K}_{\text{гн}}) \quad (2.32)$$

Аналогично для вертикальной поляризации падающей волны имеем

$$\dot{K}_{\text{вн}} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} = \frac{\dot{\epsilon}_2 \cos \gamma_1 - \sqrt{\dot{\epsilon}_1} \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \gamma_1}}{\dot{\epsilon}_2 \cos \gamma_1 + \sqrt{\dot{\epsilon}_1} \sqrt{\dot{\epsilon}_2 - \dot{\epsilon}_1 \sin^2 \gamma_1}} \quad (2.33)$$

Рассмотрим важные частные случаи. Примем, что первой является воздушная среда с  $\epsilon = 1$ , что типично при радиолокационном обзоре для ДЗЗ. Для удобства запишем комплексные коэффициенты Френеля в виде произведения модуля на фазовый множитель, а комплексную диэлектрическую проницаемость выразим через тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta_2$



**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

$$\dot{K}_{fH} = K_{fH} e^{j\theta_H}; \quad \dot{K}_{fV} = K_{fV} e^{j\theta_V}; \quad \dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_2 (1 - j \operatorname{tg} \delta_2). \quad (2.34)$$

Для углов падения, не превышающих  $\gamma_i \leq 30^\circ$ , значения модуля и аргумента коэффициента отражения можно разложить в ряд по степеням угла  $\gamma_i$

$$|K_{fH}| = K_{f0} \left( 1 + \frac{\gamma_i^2}{a_0} \right); \quad \theta_H = \theta_0 \left( 1 - \frac{\gamma_i^2}{a_H} \right) + \pi, \quad (2.35)$$

$$|K_{fV}| = K_{f0} \left( 1 - \frac{\gamma_i^2}{a_0} \right); \quad \theta_V = \theta_0 \left( 1 + \frac{\gamma_i^2}{a_V} \right), \quad (2.36)$$

где

$$K_{f0} = \frac{\sqrt{(\varepsilon_2 - 1)^2 + \varepsilon_2^2 \operatorname{tg}^2 \delta_s}}{1 + \varepsilon_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_s} + \sqrt{2\varepsilon_2 (1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_s})}}; \quad (2.37)$$

$$\theta_0 = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{2\varepsilon_2 (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_s} - 1)}}{\varepsilon_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_s} - 1} \right]. \quad (2.38)$$

Значения  $a_0$ ,  $a_H$  и  $a_V$ , вычисленные для различных видов отражающей поверхности, приведены в табл. 2.6.

**Таблица 2.6. Параметры разложения в ряд коэффициентов зеркального отражения [91]**

Вид поверхности	$\varepsilon_2$	$\operatorname{tg} \delta_s$	$K_{f0}$	$\theta_s^\circ$	$a_0$	$a_H$	$a_V$
Снег	2	0,01	0,17	1	1,4	4	1
Сухая почва, лед	4	0,01	0,33	0,5	2	2,7	2
	4	1,0	0,45	21	2,6	2,1	1,6
Влажная почва	10	0,01	0,52	0,2	3,15	2,2	2,15
	10	1,0	0,61	12	4,1	2	1,5
Пресная вода	80	0,01	0,8	0,1	9	2	2
Соленая вода	80	1,0	0,84	4	11,6	2	2

На рис. 2.12 приведены диаграммы рассеяния (отражения и преломления) радиоволн на границах воздушной среды со снегом, сухой почвой и соленой водой. Видны изменения величины зеркальной и преломленной составляющей по отношению к падающей волне, принятой за единицу.

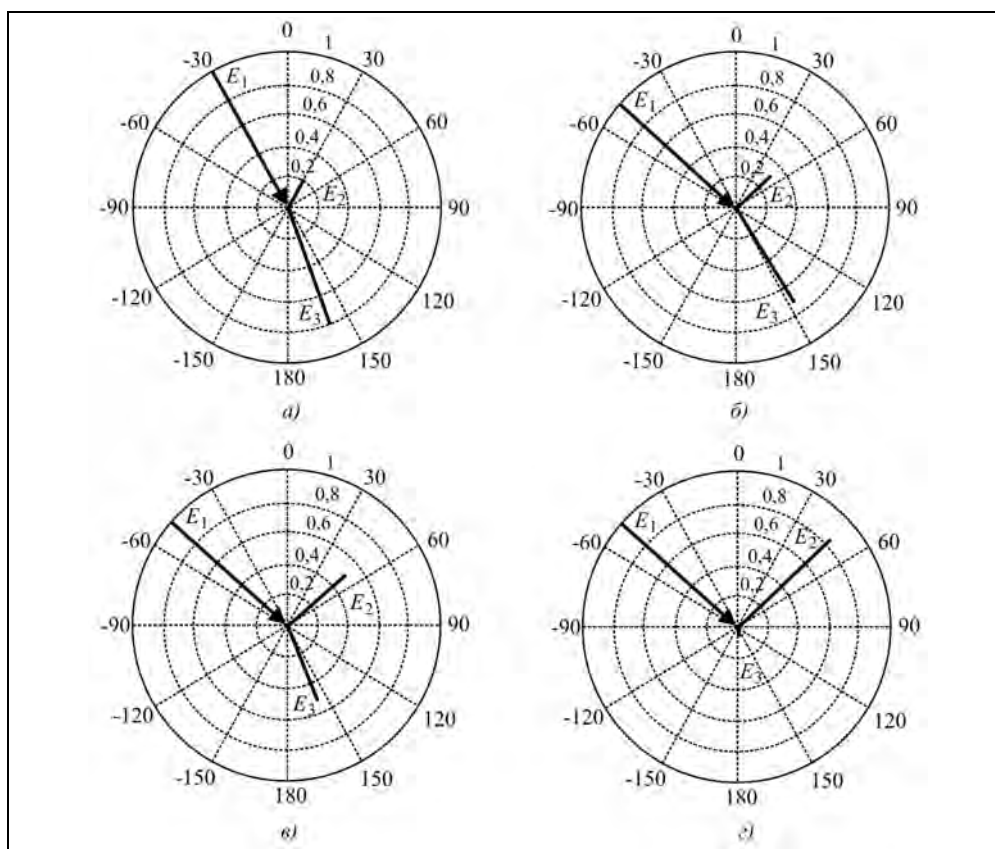


Рис. 2.12. Диаграммы отражения  $E_2$  и преломления  $E_3$  радиоволн на границе воздушной среды со снегом ( $a$  и  $b$ ), сухой почвой ( $v$ ) и соленой водой ( $z$ ) (поляризация облучения – горизонтальная, направление облучения показано стрелкой:  $a$  –  $30^\circ$ ,  $b$  –  $50^\circ$ )

Так, если  $\epsilon_2 \gg 1$  (например, водная поверхность или влажная почва) или идеально проводящая поверхность  $\sigma_s \gg 0$  (металл),  $K_{\text{дн}} \approx -1$  и  $\theta_{\text{н}} = \pi$ . Практически имеем отсутствие преломленной волны и полное зеркальное отражение. При этом для горизонтальной поляризации падающей волны фаза зеркальной составляющей поворачивается на  $180^\circ$ . На вертикальной поляризации фаза отраженной волны совпадает с фазой падающей волны, происходит только изменение направления распространения волны. Если  $\epsilon_2$  мало отличается от единицы (сухой снег), то большая часть энергии будет проходить во вторую среду, практически не меняя направления распространения, а амплитуда зеркальной волны будет малой.

Для типичных частотных диапазонов космических РСА (сантиметровые и дециметровые волны) зеркальное отражение формируется от таких объектов, как спокойная водная поверхность, асфальтовые (бетонные) дороги, взлетные полосы аэродромов и т.д. При углах падения, отличных от нуля, такие объекты не дадут

отражения в сторону РЛС и, соответственно, мощность сигнала в приемной антенне будет близка к нулю.

Определим величину зеркально отраженного сигнала для случая бистатического зондирования. При этом учтем, что в сложившейся практике дистанционного зондирования основным информационным продуктом, который поступает потребителям от службы эксплуатации современных РСА, является, так называемое, «геоисправленное» РЛИ в плановой проекции, каждый пиксель которого калиброван по значению УЭПР  $\sigma^0$ .

Рассмотрим эту особенность, используя рис. 2.11 для отражения радиоволны от гладкой границы двух сред с размерами отражающего элемента, равными  $\rho_x \rho_y$ . Поток мощности, падающий на площадку разрешения, определяется плотностью потока мощности и проекцией площадки разрешения на волновой фронт плоской волны

$$P_e = \frac{E_0^2}{\rho} \rho_x \rho_y \cos \gamma_i, \quad (2.39)$$

где  $E_0$  – напряженность электрического поля в падающей волне;  $\rho \approx 120$  Ом – волновое сопротивление среды;  $\gamma_i$  – угол падения.

Отраженная мощность на границе воздух-поверхность определится коэффициентами отражения  $K_{fH}$  или  $K_{fV}$  в зависимости от свойств поверхности и поляризации падающей волны. С их учетом ЭПР площадки зеркального излучения, а также УЭПР выразятся через формулу (2.39) для плоской пластины

$$\sigma = \frac{4\pi\rho_x^2\rho_y^2}{\lambda^2} K_{fH/V}^2 \cos^2 \gamma_i, \quad (2.40)$$

$$\sigma^0 = \frac{4\pi\rho_x\rho_y}{\lambda^2} K_{fH/V}^2 \cos^2 \gamma_i. \quad (2.41)$$

При углах падения, близких к отвесным  $\gamma_i \sim 0$  (случай надирных высотометров), корректность формул нарушается, так как падающую волну в пределах элемента разрешения по наклонной дальности нельзя рассматривать как плоскую. Аналогичное ограничение имеет место в высокоорбитальных РСА, для которых необходим учет сферичности земной поверхности. Указанными явлениями можно пренебречь при выполнении соотношений

$$R\lambda \gg \left( \frac{\rho_R}{\operatorname{tg} \gamma_i} \right)^2 \quad (2.42)$$

или

$$R_e \lambda \gg \left( \frac{\rho_R}{\operatorname{tg} \gamma_i} \right)^2, \quad (2.43)$$

где  $R$  – наклонная дальность наблюдения (близка к высоте орбиты  $H_s$ );  $R_e$  – радиус Земли;  $\rho_R$  – разрешение РСА по наклонной дальности.

В этом случае ЭПР элемента разрешения и УЭПР отражающей поверхности определяются формулами (2.40) и (2.41).

## 2.6. Отражение радиоволн от поверхности с волнообразными неровностями

Естественные земные покровы, как правило, представляют собой шероховатые поверхности. Важным случаем является отражение от поверхности с пологими неровностями. Такую поверхность можно представить в виде набора синусоидальных составляющих, полученных путем представления функции рельефа интегралом Фурье, а для периодических неоднородностей, к которым относятся поверхности с волнообразной неравномерностью – в виде ряда Фурье. Это может быть морская поверхность с ветровым волнением, пустыни с песчаными барханами и др. Для таких поверхностей даже при малой амплитуде неравномерностей возможно образование отраженного сигнала в сторону РЛС. Это вызывается тем, что радиолокатор представляет собой пространственный резонансный фильтр, настроенный на определенную длину волны спектра пространственных частот.

Действительно, согласно принципу Гюйгенса каждая точка облученной поверхности рассеивает сигналы во всех направлениях с одинаковой амплитудой. Принятый однопозиционной РЛС сигнал можно определить в виде интегральной суммы сигналов обратного рассеяния от точек облученной поверхности с учетом распределения их амплитуд и фаз по элементу разрешения  $\rho_X \times \rho_Y$  вдоль и поперек линии пути

$$\dot{E}_r = \iint_{\rho_X \cdot \rho_Y} \dot{E}(X, Y) e^{-j\varphi(X, Y)} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(Y \sin \gamma_1 - h(X, Y) \cos \gamma_1)} dXdY. \quad (2.44)$$

Геометрия наблюдения поверхности с волнообразной шероховатостью показано на рис. 2.13. Как показано в [91], для частного случая падения плоской волны с горизонтальной поляризацией на идеально проводящую поверхность с одномерной волнообразной шероховатостью  $h_m$  (см. рис. 2.13) формируется зеркально отраженная волна (как для плоской поверхности) и набор обратных плоских волн от гармоник волнистости поверхности

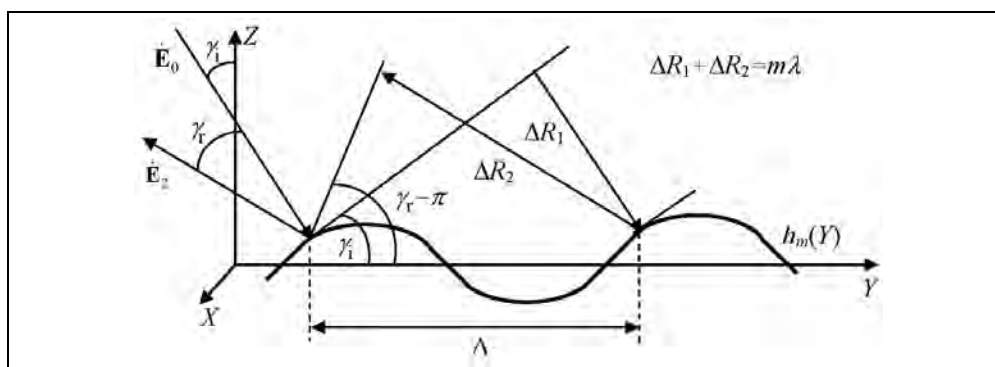


Рис. 2.13. Гармоническая составляющая шероховатости облучаемой поверхности

$$\begin{aligned} \dot{E}_{2H} = & -E_0 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(Y \sin \gamma_i + Z \cos \gamma_i)} - j2E_0 \cos \gamma_i \frac{2\pi}{\lambda} \times \\ & \times \sum_n h_m e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \left[ \left( \sin \gamma_i - \frac{n\lambda}{\Lambda} \right) Y + \sqrt{1 - \left( \sin \gamma_i - \frac{n\lambda}{\Lambda} \right)^2} Z \right]}, \end{aligned} \quad (2.45)$$

где  $h_m$  – высота неровностей;  $\Lambda$  – пространственная длина волны.

Направление распространения формируемой волны (угол  $\gamma_r$ ) определяется углом, при котором разность хода лучей, проходящих через одинаковые фазы волнистости, равна или кратна длине электромагнитной волны

$$\Delta R_1 + \Delta R_2 = \frac{\Lambda}{n} \sin \gamma_i + \frac{\Lambda}{n} \sin(\gamma_r - \pi) = \frac{\Lambda}{n} (\sin \gamma_i + \sin \gamma_r) = \lambda. \quad (2.46)$$

Механизм отражения от периодических структур называют *Брегговским рассеянием*. На рис. 2.14 приведены амплитуды составляющих отраженного сигнала: зеркальной 1 и обратного рассеяния 2 при волнообразной неровности высотой  $h_m=1$  мм с периодом  $\Lambda=2$  см, который согласован по формуле (2.47) с длиной волны РЛС  $\lambda=3$  см при угле падения облучающей волны  $\gamma_i=50^\circ$ . Уровень обратной составляющей составляет  $-18$  дБ от зеркальной составляющей, величина которой определяется формулами (2.40) и (2.41).

Отражение в сторону РЛС будет давать «резонансная» длина волны на наблюдаемой поверхности или ее субгармоники с номером  $n$

$$\Lambda = \frac{n\lambda}{2 \sin \gamma_i}. \quad (2.47)$$

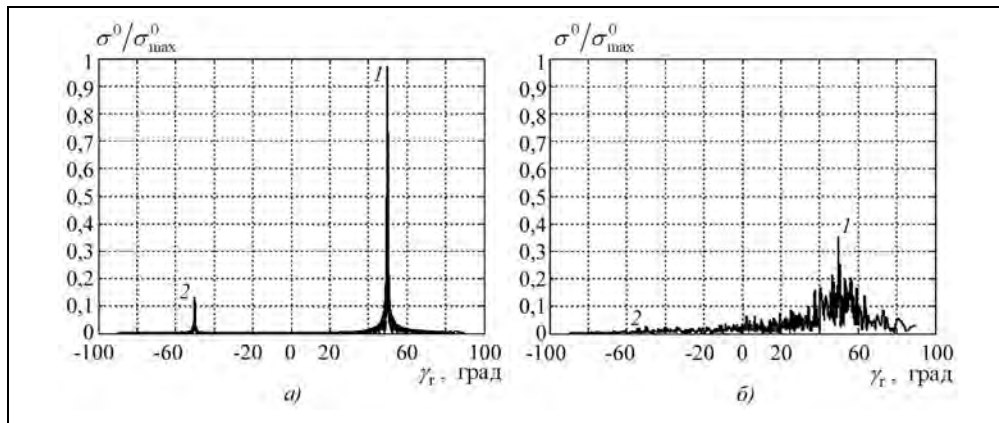


Рис. 2.14. Составляющие отраженного сигнала:

зеркальная 1 и обратного рассеяния 2 при волнообразной неровности высотой  $h=1$  мм с периодом  $\Lambda=2$  см (а) и при случайной шероховатости с  $\sigma_n=1$  мм (б); длина волны РЛС  $\lambda=3$  см (по оси ординат отложены относительные значения  $\sigma^0$ )

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

Заметим, что УЭПР зеркального отражения от шероховатой поверхности изменяется от величины, определяемой формулой (2.41) для гладкой проводящей поверхности до значения  $\sigma^0=1$  при крупной шероховатости.

### 2.7. Отражение радиоволн от поверхности с крупной шероховатостью

Большинство подстилающих поверхностей имеют неравномерности, соизмеримые или превышающие длину волны РЛС. Они дают диффузное (рассеянное) отражение во все стороны, в том числе и в направлении РЛС.

Шероховатые поверхности со среднеквадратическим отклонением от плоскости значительно превышающим длину волны РЛС  $\sigma_h \gg \lambda$  характеризуются диффузным обратным рассеянием, близким к закону Ламберта  $\sigma^0 \sim \cos \gamma$ . Для реальных подстилающих поверхностей (неровная почва, растительный покров) зависимость удельной ЭПР обратного рассеяния от угла падения может носить промежуточный характер. Расчетные графики зависимости УЭПР обратного рассеяния для шероховатой поверхности с идеальной проводимостью при разных отношениях  $\sigma_h/\lambda$  приведены на рис. 2.15. Пунктиром показан закон Ламберта.

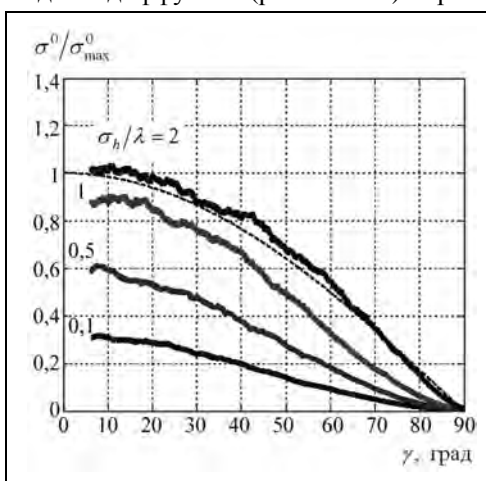


Рис. 2.15. Зависимости УЭПР обратного рассеяния от угла падения для идеальной проводящей поверхности с разной шероховатостью  $\sigma_h/\lambda$

### 2.8. Отражение радиоволн от двугранных углов

Ряд естественных и искусственных объектов (склоны ущелий, насыпи, здания и др.) при некоторых условиях могут образовывать двугранные углы, дающие интенсивный сигнал, переотраженный от двух поверхностей, как это показано на рис. 2.16. Заметим, что путь распространения при двойном отражении больше, чем при однократном. Поэтому переотраженные сигналы приходят позже основных. На рис. 2.17 показаны РЛИ сухогруза на спокойной водной поверхности, дающей компактную отметку двойного отражения от надстройки, и военного корабля при

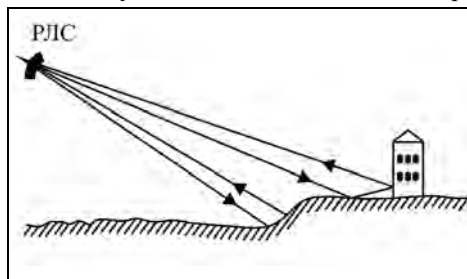
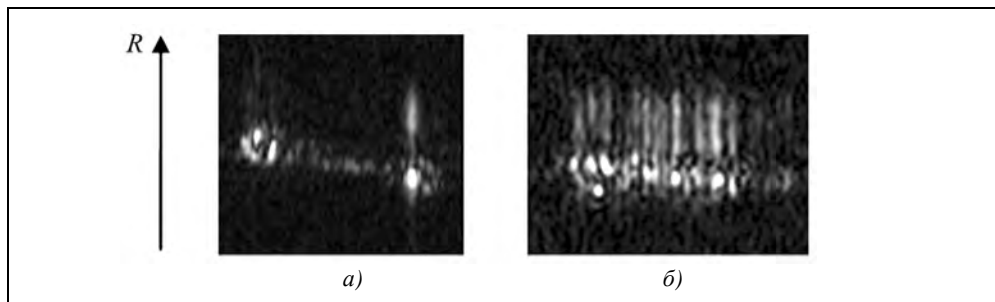


Рис. 2.16. Образование двугранных углов при отражении от рельефа местности и объектов

скорости приводного ветра 5...8 м/с, когда отражения от водной поверхности размыты. Отметки, вызванные переотражением, могут служить дополнительным дешифровочным признаком с информацией о высоте надстроек корабля.



**Рис. 2.17.** Появление дополнительных отметок на РЛИ от надстроек судов и кораблей, вызванных образованием двухгранных углов при переотражении радиоволн от морской поверхности: сухогруз (а), военный корабль (б) (стрелкой указано направление облучения (наклонная дальность  $R$ ))

## **2.9. Особенности отражения радиоволн от водной поверхности**

Из-за высокой диэлектрической проницаемости воды радиоволны отражаются только от поверхности. Отражение радиоволн от морской поверхности происходит вследствие образования мелкой структуры – ряби, вызванной ветровыми воздействиями (Бреговское рассеяние, рассмотренное в разделе 2.6). Изображение морской поверхности формируется благодаря модуляции ряби крупными ветровыми волнами, зыбью, поверхностно-активными пленками, поверхностными проявлениями внутренних волн, вызванных взаимодействием движущейся водной массы (течения, приливные явления) с топографией дна, а также движущимися подводными объектами [92, 98, 143, 281].

Информативные признаки, характеризующие физические явления на морской поверхности, содержатся в яркостных радиолокационных изображениях, отображающих интенсивность мелких (резонансных) ветровых волн, в скоростных портретах, а также в картах поля уровня.

Яркостные РЛИ поверхности океана широко распространены. Их используют при решении многих научных и народнохозяйственных задач от изучения структуры энергонесущих волн до мониторинга нефтяных разливов в прибрежных зонах и ледовой обстановки.

Возможности получения из космоса скоростных портретов поверхности океана радиолокационными методами рассмотрены в работах [69\*, 177\*, 179, 180, 296] с физическим обоснованием, оценкой точности панорамных измерений и экспериментальной проверкой в космическо-судовом эксперименте.

Пример яркостного РЛИ приведен на рис. 2.18. РЛИ получено в районе Гибралтарского пролива 1 января 1995 г. с помощью PCA ERS-1.

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

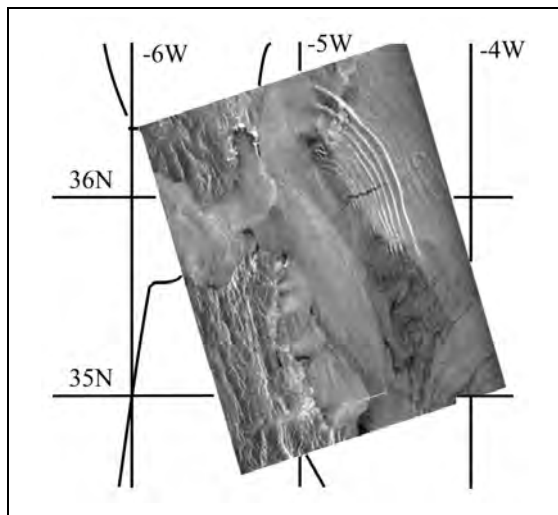
На рис. 2.18 видна область нефтяного slicka за танкером (танкер находится на расстоянии ~5 км от начала слайка). Контраст слайка составляет около -8 дБ, что говорит об интенсивной (незаконной) промывке танков. В предположении о толщине пленки ~0,1 мм при коэффициенте поверхностного натяжения 40 дин/см размер слайка соответствует разлитому объему нефти 2500 м<sup>3</sup>, т.е. с учетом ее плотности около 2000 т. Более точные количественные оценки могут быть получены путем двухчастотного зондирования, одно-временного или через небольшие интервалы времени.

Вблизи береговой линии на рис. 2.18 видна область шельфового склона. Согласно батиметрии, плоский шельф на глубине ~200 м резко обрывается, крутой обрыв достигает глубины ~1 км. Контраст составляет около -4 дБ. Анализ РЛИ позволяет выявить топографию шельфа с выявлением геологических структур в интересах разведки полезных ископаемых.

Приведем численные данные, которые характеризуют РЛИ различных образований (аномалий), выявляемых при радиолокационном зондировании морской поверхности. Следы внутренних волн на рис. 2.19, а имеют контраст +(6...8) дБ. Внутренние волны имеют приливное происхождение, а столь значительный контраст интенсивности объясняется значительной величиной скоростного градиента в области, соответствующей конвергенции (схождению) склонов волны, при передаче момента внутренних волн на поверхность.

На рис. 2.20, а имеем яркостной контраст РЛИ внутренних волн +(4...8) дБ при орбитальных скоростях ±10 см/с. На рис. 2.20, б показана деформация мелких ветровых волн на шельфовом склоне при резком увеличении глубины дна. Интенсивность волн при этом скачком уменьшается на 4 дБ, а скорость течения в направлении к локатору также уменьшается в среднем на 5 см/с.

На рис. 2.21 приведено полученное РСА S-диапазона волн «Меч-КУ» КА «Космос-1870» радиолокационное изображение пролива Пьюджет-Саунд (США) с приливным течением, выявляющим топографию дна на глубине 170...265 м. По оценке американских специалистов выявление этих эффектов свидетельствует о возможности использования радиолокационного зондирования для обнаружения движущихся подводных лодок в погруженном положении [472].

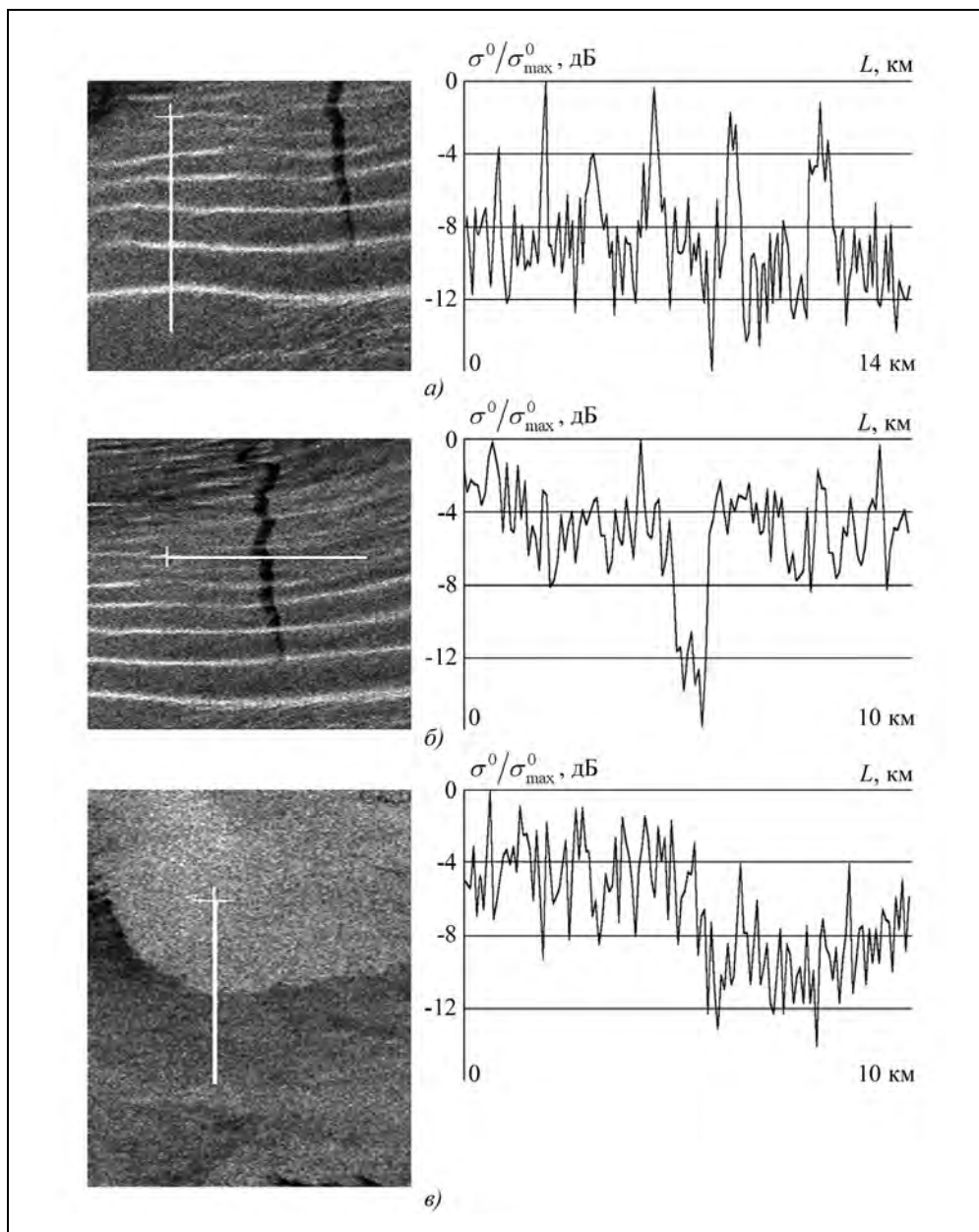


**Рис. 2.18.** РЛИ района

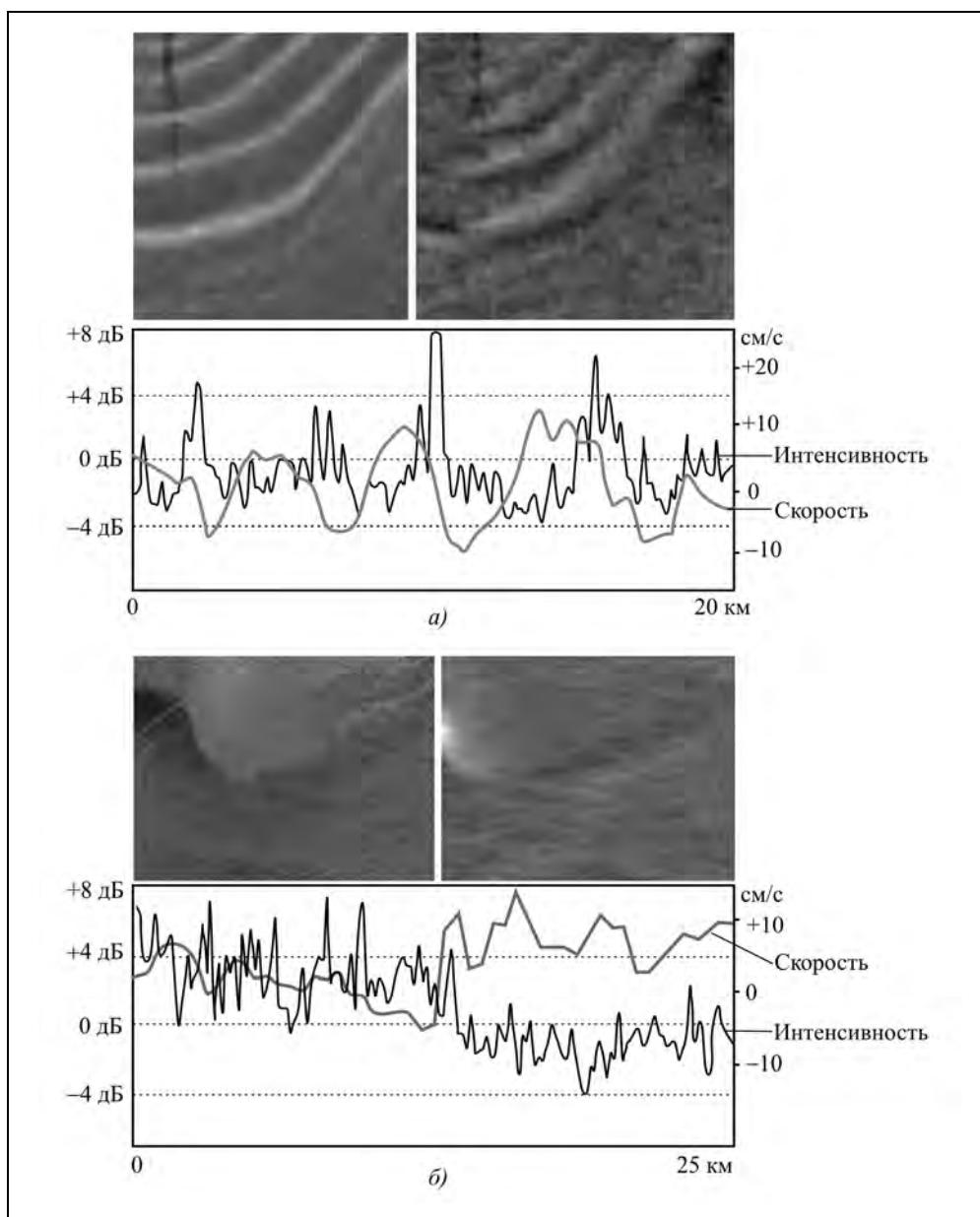
Гибралтарского пролива (ERS-1):

размер кадра 100×100 км, углы падения 22...25°, поляризация ВВ; скорость ветра в левой части РЛИ – около 10 м/с, в правой части РЛИ – около 4 м/с

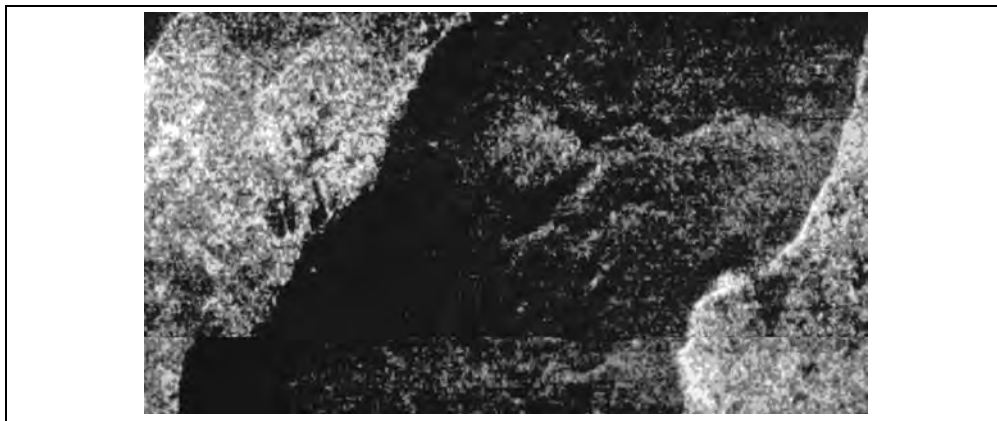




**Рис. 2.19.** Калиброванные «разрезы» на выбранных участках РЛИ рис. 2.18: *а* – фрагмент внутренних волн, контрасты +(6...8) дБ; *б* – фрагмент следа танкера (нефтяной slick), контраст -8 дБ; *в* – фрагмент шельфового склона, контраст -4 дБ



**Рис. 2.20.** Фрагменты совмещенных яркостных (слева) и скоростных (справа) изображений района Гибралтарского пролива с калиброванными «разрезами»:  
*a* – пакет внутренних волн с амплитудным контрастом (4...8) дБ при орбитальных скоростях внутренних волн на поверхности  $\pm 10$  см/с;  
*б* – «обрыв» шельфового склона с амплитудным контрастом -4 дБ и скоростным перепадом +5 см/с



**Рис. 2.21.** Радиолокационное изображение пролива Пьюджет-Саунд (США) с выявлением топографии дна благодаря взаимодействию приливной волны с рельефом дна на глубине 170...265 м (РСА «Меч-К», КА «Космос-1870»)

Действительно, движущиеся подводные объекты создают на морской поверхности возмущения (аномалии), которые, в принципе, могут быть обнаружены радиолокационными методами. К ним, в частности, относится «горб Бернулли», который представляет собой короткоживущее возмущение с геометрическими размерами, близкими к размерам движущегося объекта и высотой (от долей до единиц сантиметров), прямо пропорциональной квадрату скорости объекта и обратно пропорциональной квадрату глубины. Возможно также обнаружение возмущений дальнего поля в виде модуляции ряби, обусловленной выходом на поверхность внутренних волн, созданных движущимся подводным объектом [281]. Указанные поверхностные явления значительно более выражены, если глубина морской поверхности менее «глубины скачка» (около 100 м), что типично для многих прибрежных акваторий. Решение рассматриваемой задачи затруднено наличием близких по характеру аномалий природного происхождения или вызванных другими источниками, а также разрушающим влиянием ветрового воздействия на радиолокационные изображения морской поверхности.

### **Характеристики отражения от морской (водной) поверхности**

При изучении морского волнения широко используют методы спектрального анализа. Для описания спектров развитого ветрового морского волнения пользуются моделью Пирсона–Московица (Pierson–Moskowitz [193, 444]). Она определяет распределение энергии по частотам волнения. Предполагается, что ветер непрерывно дует равномерно в течение длительного времени на большой площади, и волны достигают установившегося значения в равновесии с ветром. Формульная зависимость имеет вид

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left\{ -\beta \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right\}, \quad (2.48)$$

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

где  $S(\omega)$  – спектральная плотность волнения;  $\omega$  – угловая частота;  $\alpha = 0,0081$  – константа Филиппса;  $\beta = 0,74$ ;  $\omega_0 = \frac{g}{U_{19,5}} = \frac{1,026g}{U_{10}}$  – пиковая угловая частота;  $U_{19,5}$  и  $U_{10}$  – скорости ветра на высотах 19,5 и 10 м над поверхностью моря.

На рис. 2.22 приведены значения спектральной плотности морского волнения  $F_{PM}$ , м<sup>2</sup>/Гц в зависимости от частоты  $f$ .

В заключение данного раздела приведем усредненные зависимости  $\sigma^0$  морской поверхности от угла падения (рис. 2.23). Отмечается [214] большой разброс измерений  $\sigma^0$  (до 3 дБ) даже в одной серии экспериментов. Зависимость  $\sigma^0$  от угла падения в пределах 10...45° достаточно резкая (0,7 дБ/град) при слабой зависимости от длины волны и поляризации. На пологих углах падения наблюдается резкое падение  $\sigma^0$ , особенно для горизонтальной поляризации.

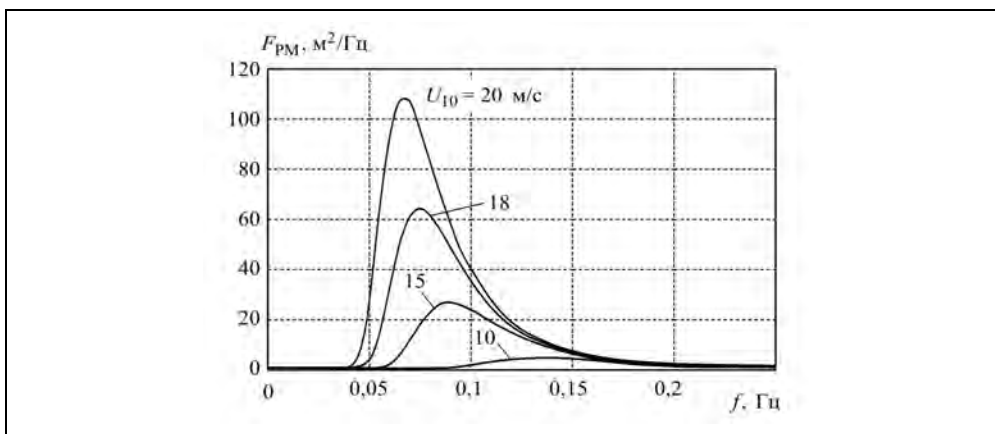


Рис. 2.22. Модель Пирсона–Московица для спектральной плотности морского волнения при разной скорости приводного ветра  $U_{10}$  на высоте 10 м

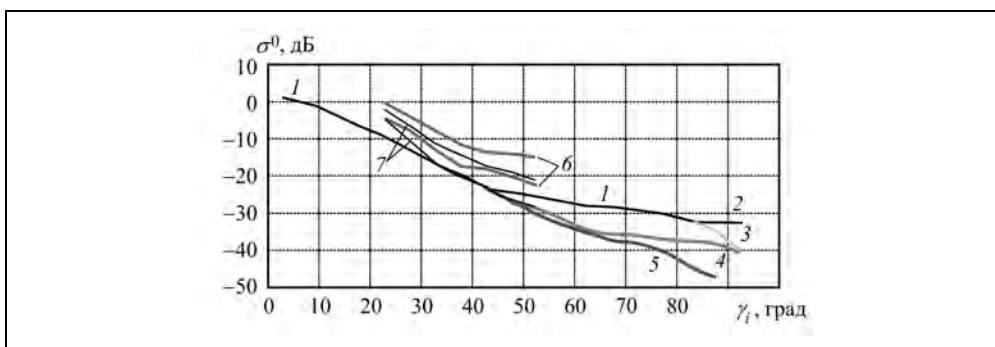
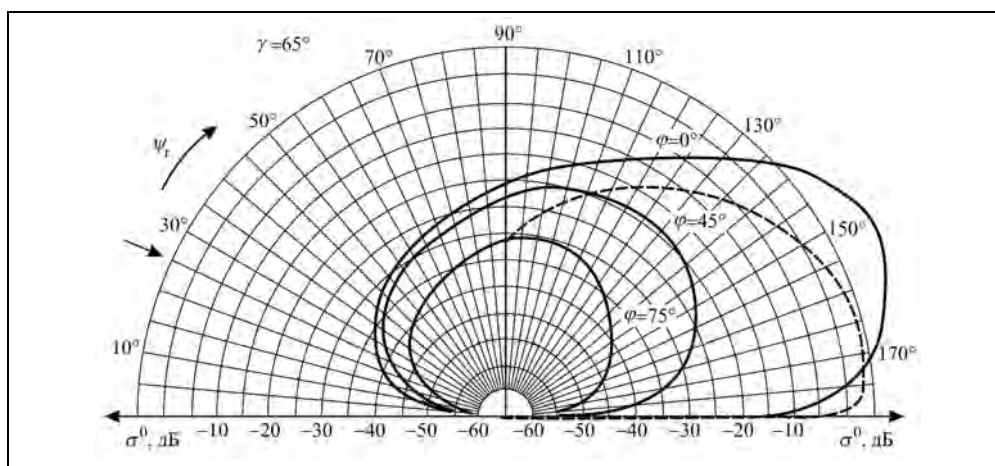


Рис. 2.23. Зависимость  $\sigma^0$  морской поверхности от угла падения:

1 –  $\lambda = 3-30$  см (ВВ и ГГ); 2 –  $\lambda = 3$  см (ВВ); 3 –  $\lambda = 15-30$  см (ВВ); 4 –  $\lambda = 3$  см (ГГ); 5 –  $\lambda = 15-30$  см (Г); 6 –  $\lambda = 5,6$  см (ВВ), скорость ветра 10 и 4 м/с; 7 –  $\lambda = 5,6$  см (ГГ), скорость ветра 10 и 4 м/с, ракурс – вдоль гребня волн

Применительно к режимам бистатического зондирования следует учитывать рассеяние волн в двумерном полупространстве. Примеры индикатрис рассеяния (по углу места  $\psi_r$  и отвороте плоскости наблюдения  $\varphi$ ) при облучении морской поверхности под углом падения  $\gamma=65^\circ$  даны на рис. 2.24 [225]. Индикатрисы построены в функции угла места луча приемной антенны  $\psi_r$  при различном азимутальном разnose  $\varphi = 0^\circ, 45^\circ$  и  $75^\circ$ . Расчеты велись на базе метода малых возмущений, скорость ветра не указана.



**Рис. 2.24.** Индикатрисы рассеяния на морской поверхности радиоволны горизонтальной поляризации ( $\lambda=3,0$  см) при угле падения излучающего луча  $\gamma=65^\circ$

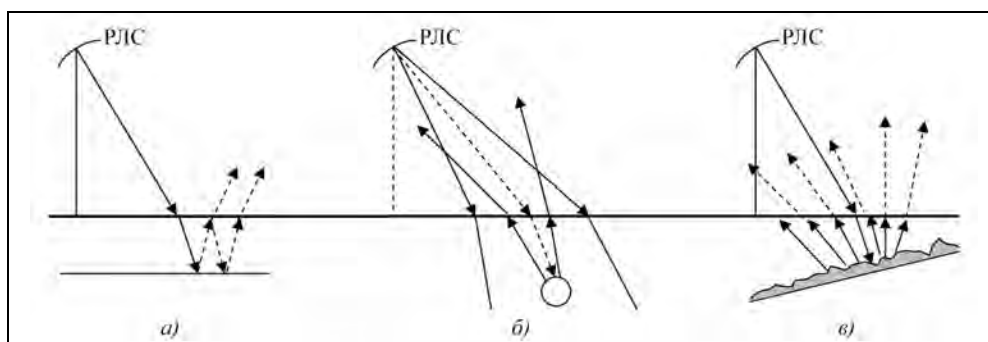
Радиолокационная съемка морской (водной) поверхности может эффективно использоваться для изучения гидродинамических процессов в океане и озерах, ветрового волнения и зыби, гидрологических фронтов, динамики течений, поверхностных проявлений внутренних волн, загрязнений, исследования механизма взаимодействия океан-атмосфера в интересах фундаментальной и промысловой океанологии, обеспечения безопасности судоходства, рыбной ловли, оценки биопродуктивности внутренних водоемов и морей, климатологии, экологии, оперативной оценки гидрологической обстановки при наводнениях, паводках, составления геологических карт и поиска полезных ископаемых в зоне прибрежного шельфа. При статистической обработке данных зондирования водной поверхности (измерения  $\sigma^0$ , спектров волнения и др.) возможно усреднение данных в пределах больших участков – до  $10^4 \dots 10^5$  м<sup>2</sup>, что позволяет реализовать высокое радиометрическое разрешение (доли децибел).

## 2.10. Глубинное (подповерхностное) зондирование

Для поверхностей с низкой диэлектрической проницаемостью (сухой грунт, песок, снег) возможно отражение от подповерхностных слоистых структур, особенно при зондировании на дециметровых или метровых волнах. На рис. 2.25 показаны неко-

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

торые примеры ситуаций, встречающихся при подповерхностном зондировании: горизонтальная слоистая структура, компактный рассеивающий объект (сфера) и шероховатая поверхность под гладкой границей воздух/пропускающая среда. Расчеты суммарных сигналов, отраженных от границ сред, а главное разделение отражений от верхней поверхности и заглубленных образований, в общем случае является сложной задачей, подход к решению которой изложен, например, в работах [17, 360\*, 374\*, 375\*, 461, 548].



**Рис. 2.25.** Геометрия отражения от глубинных объектов с высокой проводимостью или диэлектрической постоянной при подповерхностном зондировании разных сред: *а* – плоская горизонтальная поверхность; *б* – сфера; *в* – наклонная шероховатая поверхность

Проникающая способность радиоволн зависит от коэффициентов затухания радиоволн в среде распространения, значения которых приведены в табл. 2.7.

**Таблица 2.7. Коэффициент затухания радиоволн в разных средах, дБ/м [186, 193]**

Объект наблюдения	Длина волны РЛС, см				
	3	10	30...60	100	300
Снег		0,3		0,036	
Пресный лед	1,3...2,0	0,2...0,48	0,8...0,7	0,6	0,3
Морской лед, температура:	-5°	270...540	2	2	2,5...6
	-40°	14...45	0,4	0,3	1...5
Мерзлая почва					0,8...4,2
Кварцевый песок	1,7...2,0				
Песчаный грунт, влажность:	3 %	300	25	6...3	2
	12 %	1100	90	20...10	8
Глинистый грунт, влажность:	3 %	300	30	30...20	18
	12 %	1400	200	100...80	60
Сельскохозяйственные культуры	2...10	1,8...2,5	0,8...1,8	0,07	0,03
Леса	1,5...2,5	0,35	0,12...0,2	0,07	0,03

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Более простые ситуации – обнаружение объектов и контроль их геометрии (например, продуктопроводов) под снежным покровом, гляциологические исследования, построение карт рельефа территорий, покрытых лесом, не требуют специальных алгоритмов послойного дешифрирования. Даже в *L*-диапазоне волн при разрешающей способности РЛИ около 10 м были получены ценные материалы в интересах археологии при съемках в северной Африке [474, 522]. На рис. 2.26 (ср. рис. Ц.2) дано сравнение летнего и зимнего снимков месторождения Лангепас, Западная Сибирь. На летнем снимке интенсивная равнинная растительность маскирует структуру почвенного слоя.

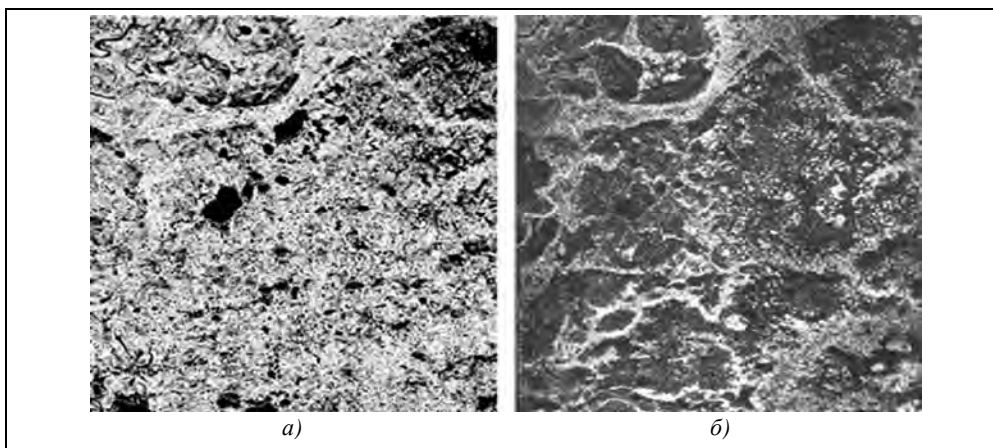


Рис. 2.26. Сравнение летнего (а) и зимнего (б) снимков (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»; месторождение Лангепас, Западная Сибирь)

Особые перспективы имеет зондирование с применением видеоимпульсных РСА при реализации в низкочастотной (200...400 МГц) области электромагнитного спектра разрешающей способности порядка 1,5...2 м, что позволит разделить отражения от поверхностного слоя и глубинных образований. Зондирование под разными углами падения позволит применить технологии томографической обработки данных.

### 2.11. Отражение радиоволн от растительного покрова

Для растительных покровов в зависимости от диапазона волн возможны разные механизмы формирования отраженного сигнала. Для коротких сантиметровых волн (*K*-, *X*-, *C*-диапазоны) основное отражение формируется зеленой массой, причем в случае интенсивной растительности – ее верхним слоем (рис. 2.27). На более длинных волнах (*S*- и *L*-диапазоны) лиственный покров оказывается более «прозрачным» (уменьшается уровень отражения и затухание в листве). Отраженный сигнал формируется объемным рассеянием, частично от листвы, частично от древесной массы, а также отражением от поверхностного слоя почвы. В длинноволновых дециметровых и метровых диапазонах отражение формируется в основном древесной массой, почвой, а также подпочвенным слоем.

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

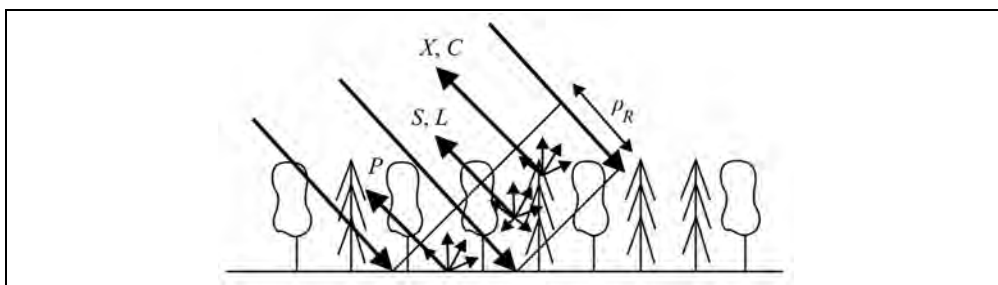


Рис. 2.27. Образование отражения в сторону РЛС от растительного покрова

Мощность отраженного сигнала зависит от объема биомассы, содержания влаги, определяемых типом растительности, фазой вегетации и сезонными изменениями, а также от длины волны РСА и поляризации излучения. Так, на рис. 2.28 представлены типичные зависимости  $\sigma^0$  от угла наблюдения в  $C$ - и  $L$ -диапазонах при разной поляризации для лесных массивов. В зависимости от длины волны проявляется разный механизм отражения. В коротковолновых диапазонах  $Ku$ ,  $X$ ,  $C$  основное отражение дает листва (зеленая масса), в диапазонах  $S$ ,  $L$ -ветви, в диапазоне  $P$  и на метровых волнах – стволы и почвенный слой. Поляризационные зависимости отражения также отчетливее выражены в более длинноволновых диапазонах.

Задача радиолокационного зондирования растительного покрова в современных условиях – получение количественной информации об объеме биомассы, степени созревания в целях прогноза урожая, выявления заболеваний, контроля применения агротехнологий или оценки динамики рубочных работ для лесных массивов. Актуальной задачей является также точная типизация растительности, например для выявления посевов наркотических растений. Для решения этих задач используются поляризационные и спектральные различия в отражении от подстилающей поверхности, выявляемые при комплексном дешифрировании данных.

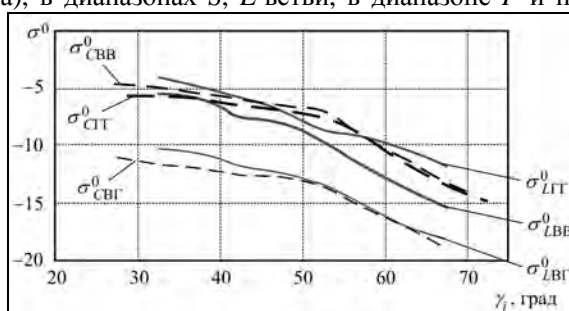


Рис. 2.28. Зависимости  $\sigma^0$  лесного покрова европейского региона от угла падения в  $C$ -диапазоне (пунктирные линии) и  $L$ -диапазоне (сплошные линии) при ВВ, ГГ и ВГ

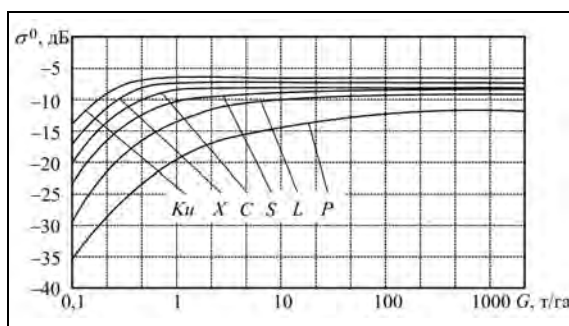


Рис. 2.29. Усредненные зависимости  $\sigma^0$  растительного покрова от объема биомассы в разных диапазонах волн при согласованной поляризации



Наибольшее отражение от растительности наблюдается в коротковолновых диапазонах. Однако при определенном уровне биомассы наступает ограничение в значении  $\sigma^0$  и могут отсутствовать различия в отраженном сигнале от леса и полей. Зависимость  $\sigma^0$  от объема биомассы представлена на рис. 2.29 (данные [388, 522], дополненные кривыми *S*- и *Ku*-диапазонов). Поэтому более длинноволновые диапазоны оказываются существенно более информативными для решения тематических задач.

В следующих разделах приведены характерные зависимости, иллюстрирующие влияние параметров аппаратуры, условий наблюдения и свойств подстилающей поверхности на ее отражательную способность при радиолокационном зондировании.

## **2.12. Влияние угла облучения на отражающие характеристики местности**

Влияние угла облучения (угла скольжения  $\beta$  от горизонтали или угла падения  $\gamma$  от местной вертикали) на уровень отраженного сигнала зависит от степени шероховатости поверхности. Для описания этих зависимостей в литературе рассматривают аппроксимирующие модели (закон Ламберта, равномерное рассеяние), а в качестве количественных показателей, кроме параметра УЭПР  $\sigma^0$ , используют параметр  $\gamma$  (не смешивать с углом визирования, введенным в гл. 3), удобный для описания отражающих свойств подстилающей поверхности при самолетном землеобзоре с малыми углами скольжения  $\beta$  (для космических РСА это соответствует большим углам падения  $\gamma_i = \pi/2 - \beta$ ). Параметр  $\gamma$  определяет отношение ЭПР  $\sigma$  элемента разрешения не к его площади (как  $\sigma^0$ ), а к площади проекции элемента разрешения на направление визирования

$$\gamma = \frac{\sigma}{\rho_x \rho_y \sin \beta} = \frac{\sigma^0}{\sin \beta} = \frac{\sigma^0}{\cos \gamma_i}. \quad (2.49)$$

Во избежание путаницы в дальнейшем будем называть параметр  $\gamma$  «показателем рассеяния».

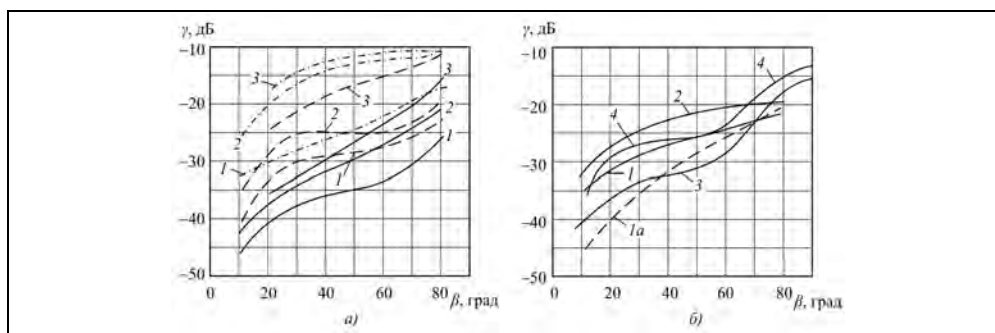
Гладкие поверхности (бетон, асфальт, гравий) характеризуются резкой зависимостью мощности отраженного сигнала от угла облучения: показатель рассеяния  $\gamma$  может меняться на 10...15 дБ (обычно возрастает) при изменении угла  $\beta$  в пределах 10...60°, что соответствует изменению удельной ЭПР или мощности отраженного сигнала на 18...23 дБ (предполагается, что мощность РЛС не зависит от угла наблюдения). Аналогичный характер имеет угловая зависимость отражения от пашни, песчаной и холмистой пустыни и снежного покрова. Отражения от травяного покрова в восьмимиллиметровом диапазоне (его нет в выделенных для зондирования из космоса) характеризуется параметром  $\gamma = \text{const}$ . Более «шероховатые» поверхности, например, лесистая местность, имеют почти изотропное изображение – их УЭПР практически не зависит от угла скольжения.

Показатель рассеяния  $\gamma$  удобно применять для характеристики поверхностей, у которых рассеяние подчиняется закону Ламберта, тогда он не зависит от угла скольжения. Показатель рассеяния, как и значение  $\sigma^0$ , обычно выражают в децибелах.

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

При оценке отраженного сигнала следует учитывать, что угол падения (скольжения) на конкретном участке местности определяется двумя составляющими – направлением облучения и местным наклоном рельефа. Поскольку разрешение РЛС по наклонной дальности фиксировано, размер элемента разрешения по горизонтальной дальности и его площадь изменяются обратно пропорционально синусу угла падения (косинусу угла скольжения). Это приводит к тому, что склоны, обращенные к локатору, отражают больший сигнал, чем склоны, обращенные от локатора. В ряде случаев, при нормализации выходного радиолокационного изображения этот эффект корректируют по топографическим данным о величине уклонов местности [314].

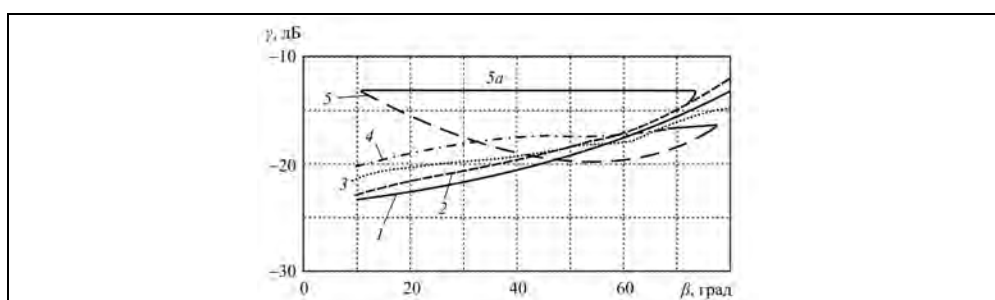
На рис. 2.30–2.32 приведены зависимости показателей рассеяния  $\gamma$  и значений  $\sigma^0$  от угла скольжения для разных типов подстилающей поверхности, рабочих диапазонов волн РЛС и поляризаций (согласных) при излучении и приеме.



**Рис. 2.30.** Зависимости показателей рассеяния от угла скольжения для гладких и шероховатых поверхностей в различных диапазонах волн:

*a* – гладкий бетон (сплошная кривая); гладкий асфальт (пунктирная кривая); гравий (штрих-пунктирная кривая);

ГТ:  $\lambda = 3$  см (1);  $\lambda = 2$  см (2);  $\lambda = 8$  мм (3); *b* – длина волны  $\lambda = 3$  см: 1 – асфальт (ВВ); 1а – асфальт (ГТ); 2 – пашня; 3 – песчаная пустыня; 4 – холмистая пустыня с растительностью (кривые 2 – 4 имеют близкие значения при ВВ и ГТ)

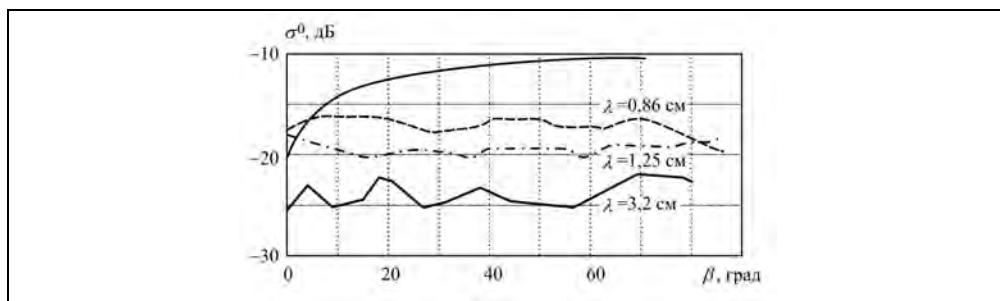


**Рис. 2.31.** Зависимости показателей рассеяния от угла скольжения

в двухсантиметровом диапазоне волн для снежного покрова и травы (ВВ):

1 – снежный покров толщиной 10 см, содержание воды  $171 \text{ г/дм}^3$ , температура минус  $7^\circ\text{C}$ ; 2 – бурая трава (ноябрь); 3 – снег со следами колес, температура  $-7^\circ\text{C}$ ; 4 – снег с тонкой коркой, содержание воды  $155 \text{ г/дм}^3$ , температура  $-14^\circ\text{C}$ ; 5 – зеленая трава высотой 5 см (5а – отражение от травы в 0,86-сантиметровом диапазоне)

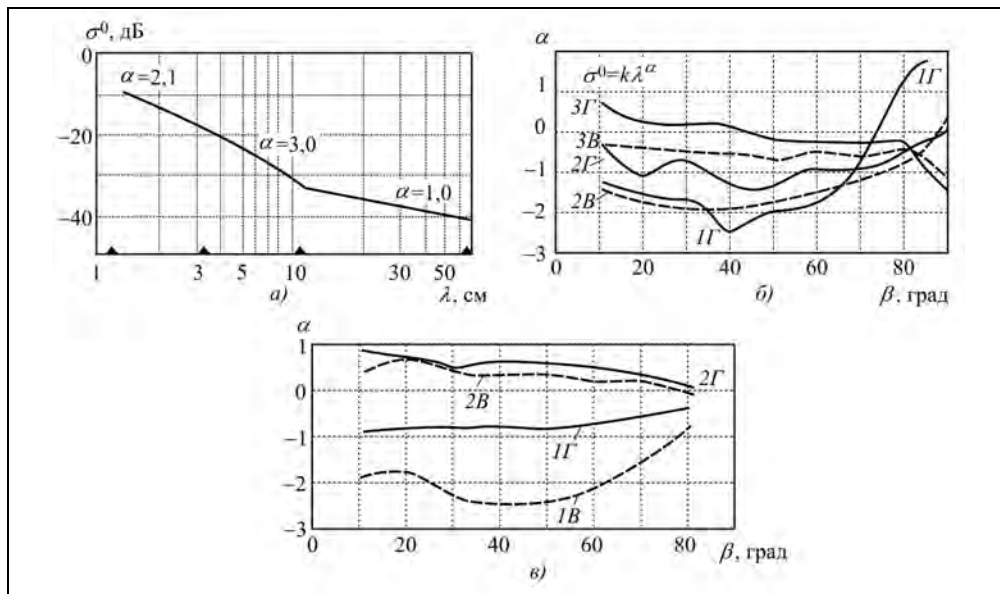
## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования



**Рис. 2.32.** Зависимость УЭПР  $\sigma^0$  лесистой местности от угла наблюдения для различных диапазонов волн, плавная кривая соответствует значениям  $\sigma^0$  при  $\gamma = \text{const}$

### 2.13. Влияние длины радиоволны на отражающую способность местности

Отражающая способность большинства поверхностей уменьшается с увеличением длины волны РЛС (пропорционально  $\lambda^\alpha$ , где  $\alpha$  зависит от характера поверхности). На рис. 2.33, *a* показана зависимость УЭПР взволнованной морской поверхности от длины волны РЛС, построенная по данным измерений на длинах волн 1,25; 3,2;



**Рис. 2.33.** Зависимость УЭПР и показателя степени  $\alpha$  при  $\lambda$  от длины волны для морской поверхности при угле скольжения  $50^\circ$  (*a*); зависимости показателя степени  $\alpha$  при  $\lambda$  от угла скольжения для различных поверхностей при горизонтальной (Г) и вертикальной (В) поляризациях (*б*, *в*):

*б* – взволнованная морская поверхность (кривая 1Г,  $\lambda = 0,86 \dots 71$  см), лес (кривые 2В, 2Г,  $\lambda = 3 \dots 20$  см), городская застройка (кривые 3В, 3Г,  $\lambda = 2 \dots 3$  см); *в* – трава (кривые 1В, 1Г,  $\lambda = 1,25 \dots 3$  см), снег (кривые 2В, 2Г,  $\lambda = 1,25 \dots 3$  см)

## Глава 2. Взаимодействие радиоволн с объектами радиолокационного наблюдения

10 и 70 см (отмечены на рисунке по оси  $\lambda$ ). На рис. 2.33, б, в даны значения показателя степени  $\alpha$  при  $\lambda$  для различных поверхностей в зависимости от угла скольжения. Следует отметить, что в отличие от других поверхностей снег имеет возрастающую зависимость отражающей способности от длины волны, отражающая способность застроенной территории практически не зависит от длины волны.

Различия отражающей способности местности от длины волны используют для идентификации типа подстилающей поверхности путем комплексной обработки радиолокационных данных, полученных в разных диапазонах. Это реализуется путем синхронной радиолокационной съемки с помощью многочастотных РСА (AIRSAR, SIR-C, ИМАРК и др.) либо совместной обработкой снимков, полученных независимо.

В табл. 2.8 приведены сводные данные по удельной ЭПР  $\sigma^0$  в зависимости от диапазона волн РСА и поляризаций (ГГ и ВВ) для различных земных покровов, усредненные по многим справочным данным [33\*]. В табл. 2.9 приведены данные по УЭПР в S-диапазоне волн ( $\lambda = 10$  см), а также значения показателя степени при ос-

**Таблица 2.8. Удельная ЭПР земных покровов при разных длине волны, поляризациях и углах падения**

Объекты	Угол падения	$\lambda = 3$ см		$\lambda = 10$ см		$\lambda = 23$ см		$\lambda = 70$ см	
		ГГ	ВВ	ГГ	ВВ	ГГ	ВВ	ГГ	ВВ
Море, волнение 2 балла	10	-40	-32	-42	-40	-45	-45	-50	-50
	20	-38	-28	-39	-35	-40	-40	-45	-45
	50	-35	-30	-36	-33	-38	-36	-35	-35
Море, волнение 6 баллов	10	-35	-30	-33	-30	-30	-30	-35	-35
	20	-30	-25	-29	-25	-29	-25	-32	-32
	50	-27	-22	-27	-22	-28	-23	-30	-30
Взлетно-посадочная полоса	10	-40	-30	-40	-35	-45	-40	-60	-60
	20	-32	-24	-35	-30	-40	-36	-58	-58
	50	-20	-18	-25	-23	-30	-27	-55	-55
Степь, зима, снег	10	-23	-23	-35	-35	-33	-35	-60	-60
	20	-17	-17	-30	-30	-30	-30	-55	-55
	50	-14	-14	-23	-23	-23	-23	-50	-50
Степь, лето, трава	3	-35	-35	-35	-35	-40	-40	-60	-60
	10	-16	-16	-20	-20	-28	-28	-55	-55
	20	-15	-15	-19	-19	-25	-25	-53	-53
	50	-12	-12	-16	-16	-20	-20	-50	-50
Пустыня, камни, песок	10	-18	-20	-30	-35	-35	-35	-45	-45
	20	-15	-17	-28	-33	-30	-30	-40	-40
	50	-12	-14	-15	-15	-15	-17	-35	-35
Лес	10	-14	-14	-21	-22	-25	-23	-35	-35
	20	-14	-15	-20	-21	-20	-18	-30	-30
	50	-12	-12	-14	-14	-14	-14	-25	-25

### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

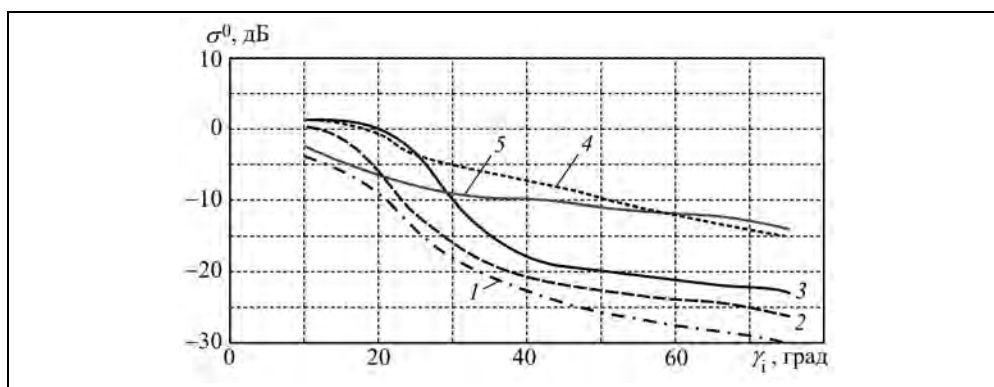
новании  $\lambda$ . Значение  $\sigma^0$  в децибелах для другой длины волны, выраженной в сантиметрах, вычисляется по формуле

$$\sigma_{дВ}^0(\lambda) = \sigma_{дВ}^0 + \alpha 10 \lg \frac{\lambda}{10}. \quad (2.50)$$

Усредненные кривые для зависимости УЭПР разного типа поверхностей от угла падения в S-диапазоне волн даны на рис. 2.34.

**Таблица 2.9. Отражающая способность земных покровов в S-диапазоне и ее зависимость от длины волны**

Тип поверхности	Угол падения, град							
	20		40		60		80	
	Параметр							
	$\sigma_S^0$ , дБ	$\alpha$	$\sigma_S^0$ , дБ	$\alpha$	$\sigma_S^0$ , дБ	$\alpha$	$\sigma_S^0$ , дБ	$\alpha$
Море, слабый ветер, до 7,7 м/с, согласованная поляризация	-18	-0,35	-21	-0,31	-27	-0,23	-36	-0,13
Море, слабый ветер, до 7,7 м/с, кроссполяризация	-45	0,3	-45,5	0,27	-46,5	0,2	-48	0,15
Море, сильный ветер, более 7,7 м/с, согласованная поляризация	-16	-0,8	-20	-0,7	-24	-0,6	-34	-0,5
Море, сильный ветер, более 7,7 м/с, кроссполяризация	-35	0,35	-37	0,3	-40	0,27	-46	0,25
Снег, лед	-8	-0,43	-14	-0,4	-24	-0,3	-27	-0,21
Пустыня	-17	-0,9	-20	-0,9	-24	-0,9	-27	-0,9
Сельская местность	-10	-1	-14	-0,9	-17	-0,7	-20	-0,42
Лес	-5	0	-12	-0,7	-19	-1,4	-26	-2,1
Горы	-13	-0,8	-16	-0,83	-20	-0,87	-23	-0,9
Город	-9	-1,3	-10	-0,8	-10,5	-0,4	-11	0



**Рис. 2.34.** Усредненные зависимости УЭПР фона для 10-см диапазона волн при вертикальной поляризации:

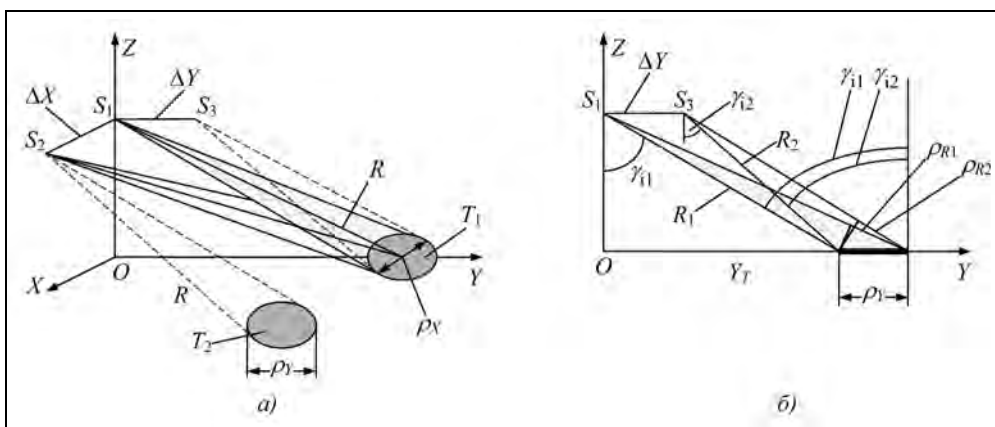
1 – море; 2 – равнина; 3 – редколесье; 4 – лес с интенсивным покровом; 5 – городская застройка

Указанные выше количественные характеристики относятся к средним значениям коэффициентов отражения наблюдаемых поверхностей. В связи со случайным характером отражения от сложных объектов и протяженной поверхности необходимо учитывать флуктуации принятых сигналов и их влияние на изобразительные и измерительные свойства получаемых РЛИ.

### 2.14. Флуктуации принимаемого радиосигнала и их связь с геометрией наблюдения

Наличие флуктуаций принятых радиолокатором сигналов приводит к тому, что уровни сигналов на выходном РЛИ соответствуют значениям УЭПР «в среднем», а в каждой точке снимка будет случайное значение яркости (плотности почернения, прозрачности), в результате чего изображение будет иметь зернистый (гранулярный) характер. Это явление называют спекл-шумом. Ниже рассмотрены корреляционные свойства принимаемых сигналов, а в разделе 3.5 – статистические характеристики процессов при формировании РЛИ.

На рис. 2.35 рассмотрен пример, когда два элемента разрешения  $T_1$  и  $T_2$  на местности наблюдаются радиолокатором в трех положениях  $S_1, S_2, S_3$  (или независимо тремя радиолокаторами). Предполагаем, что облучается поверхность с крупной шероховатостью. Размеры элемента разрешения вдоль оси  $X$  –  $\rho_X$ , вдоль оси  $Y$  –  $\rho_Y$ .



**Рис. 2.35.** Геометрия наблюдений элементов разрешения на местности при смещении положения радиолокатора (а) и сечение в плоскости  $OYZ$  (б)

Сигналы, принятые радиолокатором  $S_2$  от элементов разрешения  $T_1$  и  $T_2$ , будут полностью некоррелированы, так как они сформированы разными наборами элементарных отражателей. Сигналы, принятые радиолокаторами  $S_1, S_2, S_3$  от одного элемента разрешения  $T_1$  на местности, будут частично коррелированы в зависимости от размеров баз рассогласования  $\Delta X$  или  $\Delta Y$ . Эти сигналы сформированы одним набором элементарных отражателей, но фазы их суммирования зависят от базы рассогласования.

### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

Считается (подтверждено аналитически [152\*]), что сигналы, принятые радиолокаторами  $S_1$  и  $S_2$  или  $S_1$  и  $S_3$ , будут полностью раскоррелированы, если вызванная разворотом дополнительная разность фаз между крайними отражателями в элементе разрешения превысит  $2\pi$  (разность их расстояний  $\Delta R$  более длины волны  $\lambda$ ). Для сдвига по азимуту имеем  $\Delta R \approx \sqrt{R^2 + (\Delta X + \rho_X / 2)^2} - \sqrt{R^2 + (\Delta X - \rho_X / 2)^2} \geq \lambda$ , откуда условие декорреляции принятых сигналов

$$\Delta X \geq \frac{R\lambda}{\rho_X}. \quad (2.51)$$

Геометрия смещения вдоль оси  $Y$  показана на рис. 2.35, б. При заданном размере элемента разрешения по вдоль оси  $Y$ , равном  $\rho_Y$ , исходная (для  $S_1$ ) разность фаз между крайними отражателями определяется отношением проекции на направление визирования (т.е. размером элемента разрешения по наклонной дальности  $\rho_{R1} = \rho_Y \sin \gamma_{i1}$ , где  $\gamma_{i1}$  – угол падения) к длине волны  $\lambda$ . При смещении радиолокатора вдоль оси  $Y$  угол падения меняется и изменяются размеры элемента разрешения по наклонной дальности  $\rho_{R2} = \rho_Y \sin \gamma_{i2}$ . Декорреляция принятых сигналов возникает при смещении вдоль оси  $Y$

$$\Delta Y \geq H \left| \operatorname{tg} \gamma_{i1} - \operatorname{tg} \gamma_{i2} \right| = H \left| \frac{\sin \Delta \gamma_i}{\cos \gamma_{i1} \cdot \cos \gamma_{i2}} \right| \approx \frac{R\lambda}{\rho_Y \cos^2 \gamma_i}, \quad (2.52)$$

где  $H$  – высота РЛС;  $\Delta \gamma_i = |\gamma_{i1} - \gamma_{i2}|$  – приращение угла падения, учтено его малое значение так, что  $\sin \Delta \gamma_i \approx \Delta \gamma_i$  и  $\gamma_i = \gamma_{i1} \approx \gamma_{i2}$ .

Заметим, что для РБО сигналы декоррелируются при смещении радиолокатора вдоль оси  $X$  на величину, равную горизонтальному размеру антенны (см. гл. 3), а при наблюдении в надир ( $\gamma_i = 0$ ) формулы (2.51) и (2.52) совпадают.

Декорреляция спекл-шума при изменении условий наблюдения используется для его уменьшения путем некогерентного накопления. Сохранение когерентности при малой базе смещения используется для точного измерения разности расстояний при интерферометрической обработке снимков для построения цифровых карт рельефа и выявления изменений в оперативной обстановке.

Формульные зависимости плотности распределения амплитуды и мощности флуктуирующих сигналов в зависимости от типа детектора, применяемого при формировании РЛИ, приведены в разделе 3.5. Методы фильтрации спекл-шума изложены в гл. 7.

Вызванная спекл-шумом зернистость РЛИ хотя и ухудшает дешифрируемость РЛИ, но ее характер (текстура) может служить дополнительным дешифрирующим признаком для идентификации типа подстилающей поверхности. Размах флуктуаций для идеально шероховатой поверхности пропорционален ее УЭПР, поэтому для грубых оценок спекл-шум считают мультипликативным шумом. Однако на самом деле он несет информацию о структуре поверхности (в частности, по сочетанию моментов распределения спекл-шума различают породы деревьев, вид посевов и степень созревания и т.д.). Эти вопросы более детально рассматриваются в гл. 9.

**2.15. Временная изменчивость объектов наблюдения**

Для космических РСА высокого разрешения время синтеза может оказаться соизмеримым с временем корреляции отраженного сигнала, определяемым движением отражателей, в первую очередь, под воздействием ветровых нагрузок: морской поверхности, растительности (лес, кустарник, сельскохозяйственные культуры) и др. Согласно приведенным в литературе [193] данным, полученным экспериментальным путем, в сантиметровом диапазоне волн спектральную плотность сигналов, обусловленную собственным движением рассеивателей на земной и водной поверхности, можно аппроксимировать гауссовой кривой

$$p_v(f) = \exp[-v(f/f_0)^2], \tag{2.53}$$

где  $f_0$  – частота зондирующего сигнала;  $v$  – параметр, зависящий от типа отражающей поверхности и метеорологических условий.

Значения параметра  $v$  и ширины спектра отраженных сигналов для участков местности, покрытых лесом, а также морской поверхности приведены в табл. 2.10. Ширина спектра на уровне  $\varepsilon$  от максимума определяется соотношением

$$\Delta f_v = \frac{2f_0\sqrt{-\ln(\varepsilon)}}{v}. \tag{2.54}$$

**Таблица 2.10. Параметры спектра флуктуаций сигнала, обусловленные движением элементарных отражателей для  $\lambda=10$  см [193]**

Отражающий объект	Параметр $v \cdot 10^{-15}$	Ширина спектра по уровню 0,1, Гц
Холмы, поросшие лесом: редким, при тихой погоде; густым, при ветре 9 м/с	$3,9 \cdot 10^4$	2,5
	$2,3 \cdot 10^2$	10
Морская поверхность при ветре	14,1	38
Дождевые облака	2,3	95

В табл. 2.11 приведены параметры спектра сигналов (отношения когерентной и флуктуационной составляющих и ширина спектра), отраженных от леса при разной скорости ветра. Для сельскохозяйственных культур доля флуктуационной составляющей не превышает 25 % от когерентной, а спектр флуктуационной составляющей – как у леса при умеренном ветре.

**Таблица 2.11. Параметры спектра флуктуаций сигнала, отраженного от леса [193]**

Скорость ветра, м/с	Доля мощности флуктуационной составляющей	Ширина спектра, Гц	
		по уровню 0,5	по уровню 0,1
4,7	0,43	1,1	1,7
6,0	0,5	3,7	6,0
8,3	0,8	6,2	10,0
13,9	1,0	9,3	15,0



Движение РЛС относительно рассматриваемого участка земной поверхности приводит к доплеровскому сдвигу частоты, который в отличие от временных флуктуаций имеет регулярный характер (закон, близкий к ЛЧМ) и компенсируется в процессе синтеза апертуры. Дополнительное к регулярному закону смещение принимаемого сигнала по доплеровской частоте, вызванное движением объекта, приводит к азимутальному смещению отметок от объекта, величина которого зависит от параметров РСА. В результате будет происходить «размазывание» отметок от объекта по случайному закону в пределах, определяемых соотношением

$$\Delta X = \Delta f_v X_{\text{ant}} / \Delta F_{\text{Dop}}, \quad (2.55)$$

где  $\Delta F_{\text{Dop}}$  – смещение доплеровской частоты, вызванное собственным движением отражателей;  $X_{\text{ant}}$  – зона облучения азимутальной ДНА;  $\Delta F_{\text{Dop}}$  – ширина спектра доплеровских частот принимаемых сигналов от неподвижной поверхности.

В настоящей главе рассмотрены отражающие свойства объектов и подстилающих поверхностей, их зависимость от выбора параметров радиолокатора (длины волны, поляризации, геометрии обзора) и их связь с получаемыми радиолокационными изображениями, которые подлежат тематической обработке. Приведенные количественные данные являются основой для расчета параметров радиолокаторов, исходя из их назначения, решаемых задач землеобзора, а также ограничений, предусмотренных Регламентом радиосвязи на выбор частотных диапазонов РЛС и полосы зондирующего сигнала, определяющей разрешающую способность РЛС по наклонной дальности.

Преимущества радиолокационного зондирования в сравнении с оптическими датчиками не только в возможности получения информации независимо от времени суток и метеорологических условий, но и в измерении радиофизических параметров объектов и извлечении фазовой информации из снимков путем их интерферометрической обработки. Для реализации таких режимов должны использоваться (и каталогизироваться) комплексные радиолокационные изображения (КРЛИ) в отличие от менее информативных действительных амплитудных (АРЛИ) или энергетических (ЭРЛИ) изображений.

В следующих главах рассмотрены: построение РСА космического базирования, режимы работы РСА, связь параметров орбитального движения с характеристиками принимаемого сигнала, а также вопросы, связанные с получением радиолокационных изображений и их тематической обработкой.

---

## Глава 3

# СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗЕМЛЕОБЗОРА. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

### 3.1. Принцип действия и основные характеристики космических радиолокаторов бокового обзора

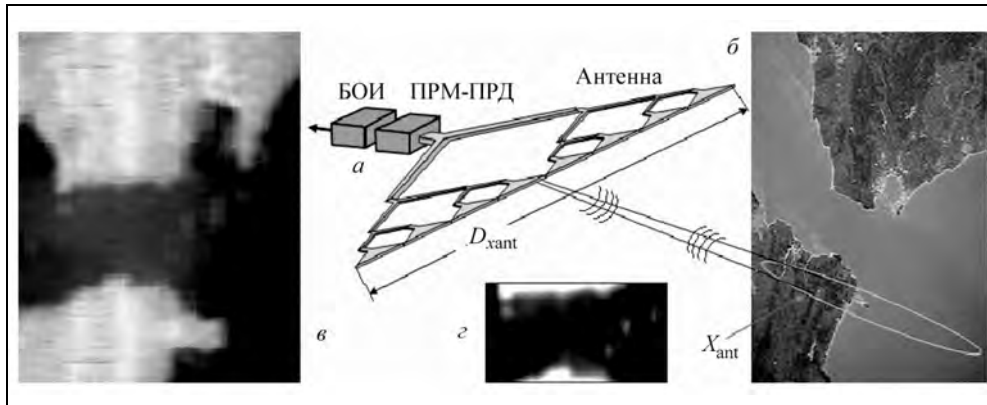
*Принцип радиолокации наземных объектов* с летательных (космических) аппаратов состоит в облучении поверхности Земли электромагнитными волнами с помощью РЛС, установленной на носителе, приеме рассеянных поверхностью сигналов, формировании радиолокационного изображения и его обработке с целью извлечения тематической информации, включая измерение характеристик объектов наблюдения. Классический случай радиолокации – когда передатчики и приемники совмещены и имеют общую антенну. Это однопозиционная или *моностатическая* радиолокация. В последние годы активно прорабатываются методы двухпозиционной (*бистатической*) или *многопозиционной* радиолокации, когда источник излучения – передатчик подсвета и приемники размещаются на разных носителях, например, передатчик на одном космическом аппарате, а приемники – на другом (других) КА, самолетах или беспилотных аппаратах. Частным случаем такой аэрокосмической системы может быть подсвет с КА на геостационарной орбите, который находится неподвижно в заданной точке над экватором, и серия пассивных приемных сенсоров аэрокосмического базирования. Используют также тандемы двух КА с РСА на близких орбитах, обеспечивающих излучение зондирующего сигнала с помощью передатчика на одном из КА и синхронный прием отраженных сигналов, приемными устройствами обоих КА. Геометрия обзора таких систем рассмотрена в разделе 3.3.

*Принцип действия* РБО иллюстрирует рис. 3.1. Бортовая аппаратура РБО включает в себя приемопередатчик (ПРМ–ПРД), антенну и блок обработки информации (БОИ), в котором формируется радиолокационное изображение (РЛИ) для его передачи по радиолинии на наземный приемный пункт. Антенна, луч которой направлен перпендикулярно линии пути, имеет большой раскрыв  $D_{\text{хant}}$  вдоль линии пути (по азимуту). Ее можно представить в виде линейки излучателей, формирующих широкий луч по вертикали и узкий – по горизонтали.

Геометрия бокового обзора для случая прямолинейного равномерного движения радиолокатора (РБО или РСА) показана на рис. 3.2. Начало координат находится на поверхности Земли. Ось  $Z$  направлена вертикально вверх, ось  $X$  направлена вдоль вектора путевой скорости носителя  $V$ , ось  $Y$  – вправо по нормали к векто-

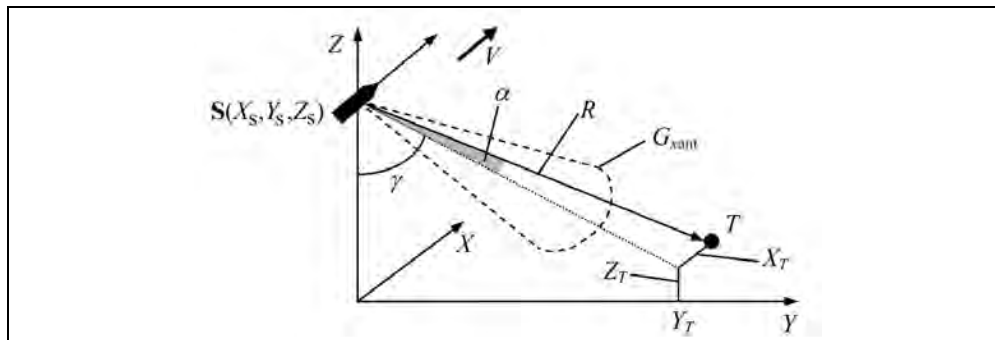
### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

ру путевой скорости. Координаты радиолокатора  $S$ :  $X_s(t)=Vt$  – вдоль линии пути;  $Y_s=0$  – поперек линии пути;  $Z_s$  – высота полета. Координаты цели:  $X_T$  – вдоль линии пути;  $Y_T$  – поперек линии пути (горизонтальная дальность);  $Z_T$  – высота цели над поверхностью Земли. Заметим, что при правостороннем обзоре, показанном на рис. 3.2, система координат  $XYZ$  левая.



**Рис. 3.1.** Принцип действия РБО:

$a$  – бортовая аппаратура РБО;  $b$  – фото района съемки (пролив Гибралтар);  
 $в$  – радиолокационное изображение (РЛИ);  
 $г$  – фрагмент РЛИ морской поверхности с отметками от кораблей



**Рис. 3.2.** Геометрия бокового обзора при прямолинейном движении

В простейшем случае антенна излучает формируемую передатчиком последовательность коротких импульсов длительностью  $\tau$ , заполненных СВЧ-колебаниями с частотой  $f_0$  и следующих с периодом повторения  $T_p$ . Излучаемый сигнал в комплексной форме имеет вид

$$\dot{U}_t(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A(t - kT_p) \exp\{j2\pi f_0(t - kT_p) + j\varphi_k\}, \quad (3.1)$$

где  $A(t)$  – огибающая импульса;  $\varphi_k$  – фаза излучаемого импульса;  $N$  – число излучаемых импульсов за время наблюдения  $t$ .

Электромагнитные колебания, излучаемые антенной, распространяются в пространстве, достигая наблюдаемой поверхности, и отражаются от нее. При наличии точечной цели, удаленной от радиолокатора на расстояние  $R$  по наклонной дальности, принятый антенной от каждого зондирования сигнал от цели будет задержан на время  $t_R = 2R/c$ , где  $c=299792448$  м/с – скорость света.

Обычно временные процессы, характеризующие принимаемые сигналы, рассматривают раздельно: для каждого зондирования и в процессе перемещения радиолокатора вдоль траектории полета. Процесс для каждого зондирования (по наклонной дальности) определяют зависимостью от «быстрого» времени  $t_R$ , отсчитываемого от момента излучения  $k$ -го зондирующего импульса. Временной процесс, связанный с движением радиолокатора вдоль траектории полета (будем применять термины «вдоль линии пути» или «по азимуту»), характеризуем «медленным» (траекторным) временем  $t_X$ . Принятый от цели сигнал определится формулой

$$\begin{aligned} \dot{U}_r(t_R, t_X) = & Q_A(R, \sigma, L_{\text{тр}}) G(\alpha) \dot{U}_T \left( t_R - \frac{2R(t_X)}{c} \right) \times \\ & \times \exp\{-j2K_x R(t_X)\}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $K_x=2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda = c/f_0$  – длина волны радиолокатора;  $G(\alpha)$  – коэффициент усиления антенны в направлении на цель;  $\alpha$  – угол отклонения направления на цель от максимума ДНА;  $Q_A(R, \sigma, L_{\text{тр}})$  – амплитудный множитель (см. уравнение дальности в разделе 3.4). Он зависит от наклонной дальности цели  $R$ , ее эффективной площади рассеяния (ЭПР)  $\sigma$ , а также коэффициента потерь на трассе распространения сигнала  $L_{\text{тр}}$ . Наклонную дальность цели  $R$  в пределах луча ДНА считают для РБО постоянной.

*Разрешающая способность* РБО и РСА по наклонной дальности определяется длительностью зондирующего импульса  $\tau$  или для современных РСА, использующих сложные широкополосные сигналы, – длительностью сжатого импульса  $\tau_c$ , определяемого шириной спектра излучения  $\tau_c = 1/\Delta F$

$$\rho_R = \frac{c\tau_c}{2} = \frac{c}{2\Delta F}. \quad (3.3)$$

*Разрешение поперек линии пути* на поверхности Земли (эту координату по аналогии с самолетными РЛС называют горизонтальной дальностью) определяется пересчетом наклонной дальности  $R$  в горизонтальную дальность  $Y$ . Для самолетных РБО и РСА, в которых наклонная дальность, как правило, значительно превышает высоту полета, значения наклонной и горизонтальной дальностей и разрешения по этим координатам близки. Для космических РБО и РСА различия существенны и определяются геометрией космического обзора с учетом высоты орбиты, кривизны Земли и других параметров.

Геометрия обзора поперек трассы полета в космических РБО и РСА представлена на рис. 3.3 с учетом сферичности Земли. Параметры обзора:  $R_s$  – радиус орбиты спутника,  $R_e$  – радиус Земли на широте цели,  $\gamma$  – угол наблюдения (визирова-

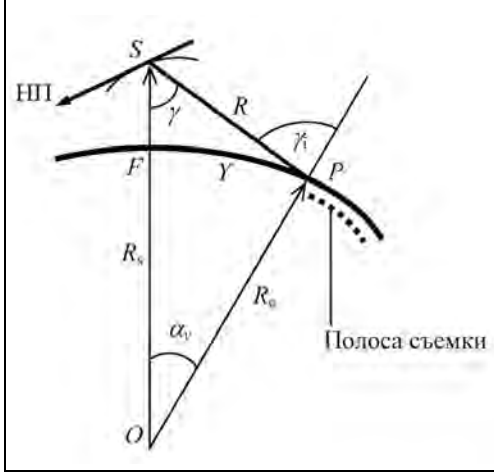


Рис. 3.3. Геометрия обзора поперек трассы движения КА в космических РБО и РСА: полоса съемки обозначена пунктиром; показано начальное положение полосы съемки

ния) от надира (подспутниковой точки),  $R$  – наклонная дальность,  $Y$  – горизонтальная дальность по дуге большого круга,  $\gamma_i$  – угол падения (относительно местной вертикали в точке наблюдения).

Основные соотношения при обзоре получаем из треугольника  $SOP$ :

по теореме косинусов

$$R^2 = R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos \alpha_y; \quad (3.4)$$

по теореме углов треугольника

$$\gamma_i = \gamma + \alpha_y; \quad (3.5)$$

по теореме синусов

$$\frac{\sin \gamma}{R_e} = \frac{\sin(180 - \gamma_i)}{R_s} = \frac{\sin \alpha_y}{R}. \quad (3.6)$$

Вычисляя, имеем угол падения (от местной вертикали в точке наблюдения)

$$\gamma_i = \arcsin\left(\frac{R_s}{R_e} \sin \gamma\right) = \arccos\left(\frac{R_s^2 - R_e^2 - R^2}{2R_e R}\right) \quad (3.7)$$

и горизонтальную дальность по дуге большого круга с углом, равным  $\alpha_y$ ,

$$Y = R_e \alpha_y, \quad (3.8)$$

где  $\alpha_y = \gamma_i - \gamma$  – центральный угол, определяющий вынос точки наблюдения относительно следа КА.

Таким образом, разрешение поперек линии пути (на поверхности Земли по дуге большого круга) в РБО и РСА для строго бокового обзора определится через разрешение по наклонной дальности и угол падения

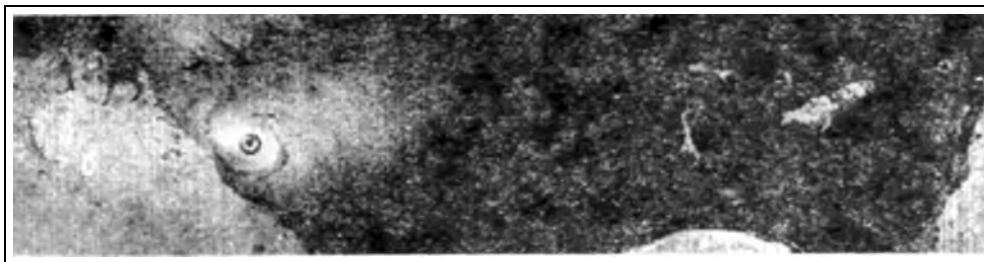
$$\rho_Y = \frac{\rho_R}{\sin \gamma_i} = \frac{c}{2\Delta F \sin \gamma_i}. \quad (3.9)$$

Разрешение вдоль линии пути (по азимуту) в случае РБО определяется шириной луча антенны по горизонтали, характеризующей область облучения  $X_{\text{ant}}$  на земной поверхности, показанную на рис. 3.1, в. Для реальных антенн ширина луча по уровню  $-3$  дБ близка к величине  $\alpha_{\text{ant}} = \lambda/D_{\text{xant}}$ , где  $D_{\text{xant}}$  – горизонтальный размер антенны РБО. Поэтому разрешение РБО вдоль линии пути

$$\rho_X = R\lambda/D_{\text{xant}}. \quad (3.10)$$

Например, для космических РБО, работавших в диапазоне волн  $\lambda \sim 3$  см, при горизонтальном размере антенны  $D_{\text{xant}} = 10$  м и дальности наблюдения  $R$ , равной нескольким сотням километров, разрешающая способность по азимуту составляла около 2 км.

Из-за низкой разрешающей способности космические РБО пригодны для глобального мониторинга поверхности океана, растительного покрова, ледовой разведки, контроля надводной обстановки. На рис. 3.4 показано радиолокационное изображение (РЛИ) тропического циклона Диана, полученное с помощью РБО «Космос-1500» [197].



**Рис. 3.4.** РЛИ тропического циклона Диана, полученное с помощью РБО «Космос-1500»

Положительным свойством некогерентных РБО является возможность работы с низкой частотой повторения зондирующих импульсов, что позволяет реализовать *большую полосу съемки* (зону захвата), которая ограничена ухудшением разрешающей способности по горизонтальной дальности при минимальном угле падения и ухудшением энергетического потенциала при максимальных наклонных дальностях

$$\begin{aligned} \Delta Y &= Y_{\max} - Y_{\min} = R_e (\alpha_{y_{\max}} - \alpha_{y_{\min}}) = \\ &= R_e \left\{ \arcsin \frac{R_{\max} \sin \gamma_{i_{\max}}}{R_s} - \arcsin \frac{R_{\min} \sin \gamma_{i_{\min}}}{R_s} \right\}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Заметим, что для плоской модели Земли углы наблюдения и падения совпадают. В РСА проблема расширения полосы съемки значительно сложнее, так как для однозначности сигналов по азимуту в космических РСА требуется высокая частота повторения зондирующих импульсов, которая вызывает неоднозначность по наклонной дальности (см. раздел 3.6).

### **3.2. Принцип действия радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны**

Основной недостаток РБО – низкое разрешение вдоль линии пути устраняется в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны (РСА). Формирование изображения по линии пути (азимуту) с получением высокого пространственного разрешения в РСА основано на когерентной обработке сигналов, принятых в процессе движения носителя РСА.

#### **Структурная схема космического РСА (рис. 3.5)**

Он включает в себя бортовой радиолокационный комплекс (космический сегмент) и наземный комплекс приема и обработки информации (наземный сегмент).

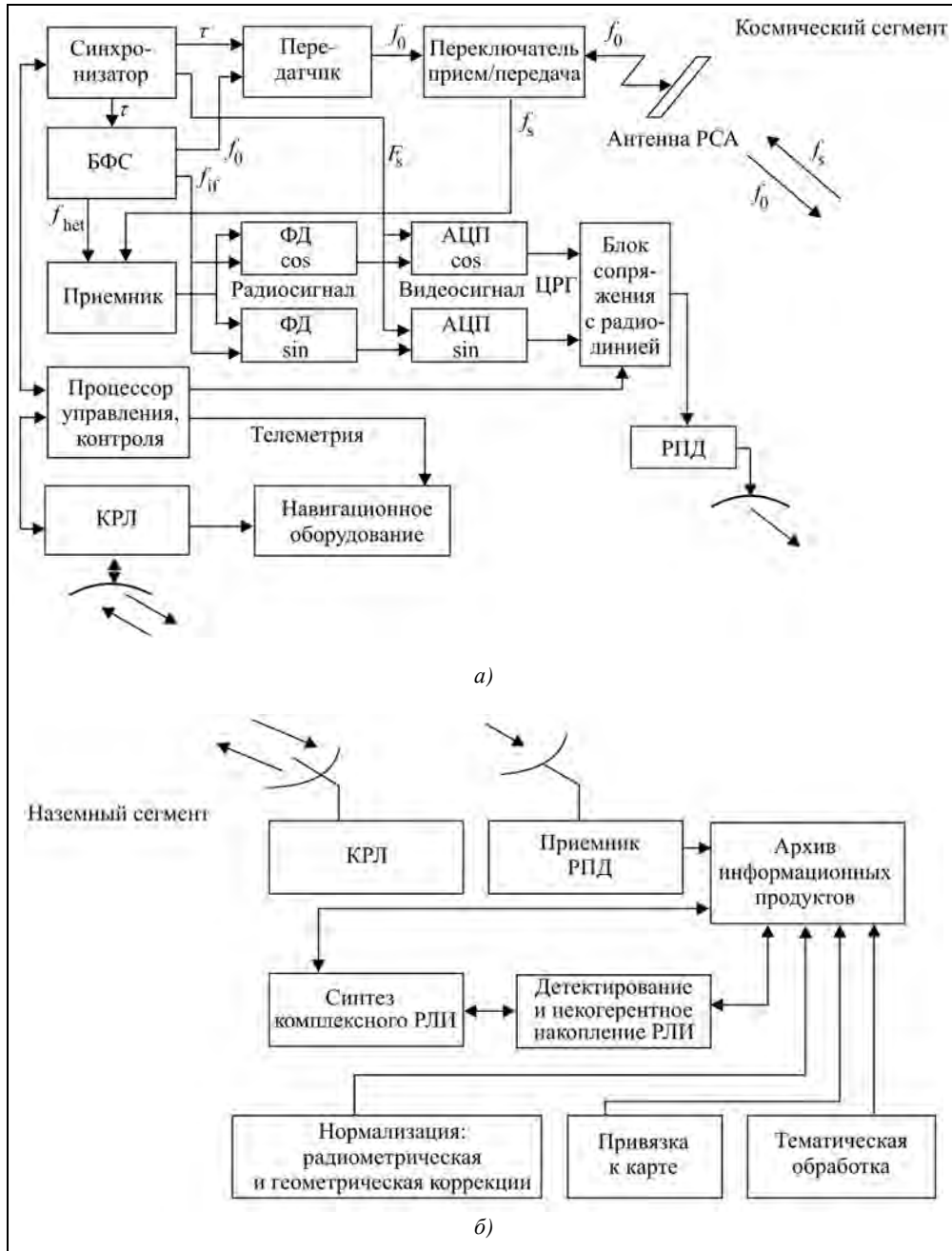


Рис. 3.5. Структурная схема системы радиолокационного наблюдения:  
 $f_0$  – несущая частота сигнала;  $f_s$  – частота принятого сигнала;  $f_{het}$  – частота гетеродина;  
 $f_{it}$  – промежуточная частота;  $F_s$  – частота квантования сигнала)

Бортовой комплекс включает в себя блок формирования сигналов (БФС), синхронизатор, передатчик, переключатель прием/передача, антенну, приемник с выходами на фазовые детекторы ФД синусного и косинусного квадратурных каналов, аналого-цифровые преобразователи АЦП квадратурных каналов, блок сопряжения с радиолинией передачи данных, процессор управления и контроля, навигационное оборудование и две радиолинии: командная КРЛ и передачи данных (РПД).

Наземный комплекс включает в себя командную радиолинию, приемник РПД, архив информационных продуктов, устройства синтеза комплексного радиолокационного изображения (КРЛИ), детектирования КРЛИ с получением амплитудного (АРЛИ) или энергетического (ЭРЛИ) изображений, их некогерентного накопления, нормализации, радиометрической и геометрической коррекций, привязки к географическим координатам (карте), а также рабочие места для тематической обработки радиолокационной информации.

Передатчик формирует зондирующие сигналы  $\dot{U}_t(t)$  и с помощью антенны облучает местность. Принятые отраженные сигналы  $\dot{U}_r(t)$  после усиления в приемнике и преобразования в квадратурные составляющие на выходах фазовых детекторов (рис. 3.5) запоминают в специальном устройстве (например, ОЗУ) с учетом их амплитуды и фазы. После этого осуществляют их когерентное суммирование, аналогичное формированию диаграммы антенны. Одновременное суммирование СВЧ-сигналов в антенной решетке РБО заменяется в РСА последовательным суммированием сигналов, принятых на участке траектории, где цель находится в пределах луча реальной антенны РЛС. Длина искусственного раскрытия синтезированной антенны  $L_{\text{synt}}$  в РСА соизмерима с размером элемента разрешения РБО вдоль линии пути  $X_{\text{ant}}$  и значительно превышает размеры физической антенны, установленной на носителе. Это позволяет реализовать высокое разрешение в РСА. Принцип действия РСА иллюстрирует рис. 3.6. На рис. 3.7 дано полное изображение района съемки с разрешающей способностью около 12 м (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1») с увеличенными фрагментами РЛИ.

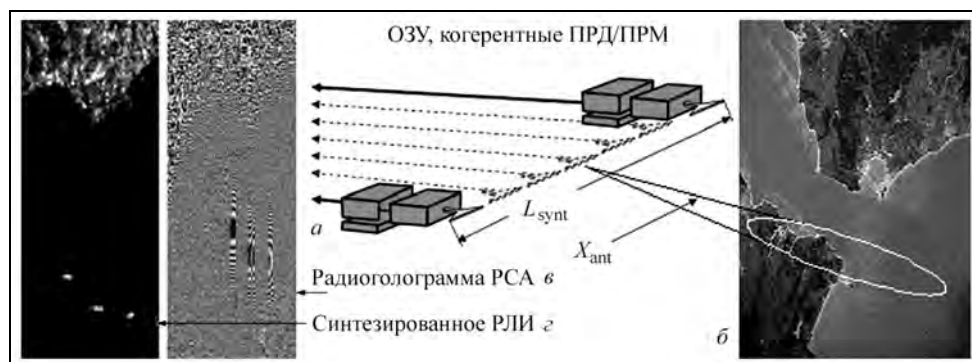
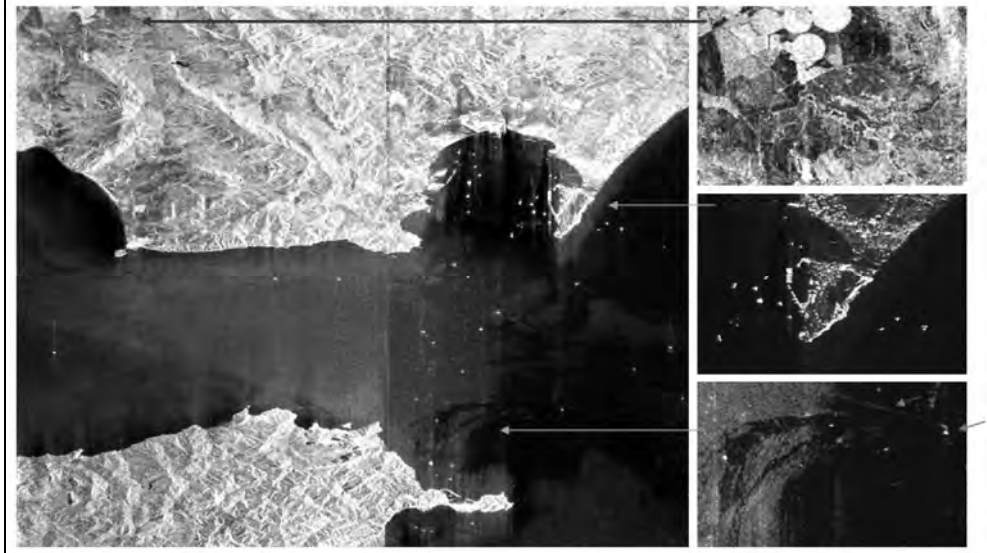


Рис. 3.6. Принцип действия РСА:

а – бортовая аппаратура РСА; б – фото района съемки (пролив Гибралтар); в – радиолограмма; г – радиолокационное изображение (РЛИ) с отметками от кораблей;  $L_{\text{synt}}$  – длина синтезированной апертуры,  $X_{\text{ant}}$  – зона облучения антенной радиолокатора





**Рис. 3.7.** РЛИ пролива Гибралтар и прилегающих горного ландшафта и долины (видны уголья круглой формы, характерной для применения автоматических сельскохозяйственных технологий, гавань с большим числом судов, морская поверхность с модуляцией ряби, вызванной ветром и влиянием загрязнений, а также кильватерный след на море от движущегося судна (показаны стрелками))

### Временные зависимости фазы, доплеровской частоты и амплитуды сигнала от одиночной точечной цели

Рассмотрим более подробно процесс формирования сигнала вдоль линии пути (по азимуту) для приведенной на рис. 3.2 геометрии бокового обзора. Для РСА нельзя пренебрегать изменениями наклонной дальности цели в процессе движения радиолокатора, так как они приводят к изменениям фазы принятого сигнала. Текущая наклонная дальность цели

$$R(t_X) = \sqrt{(Z_s - Z_T)^2 + Y_T^2 + (Vt_X - X_T)^2}, \quad (3.12)$$

где  $t_X$  – «медленное время», характеризующее движение радиолокатора.

Обычно  $V \cdot t_X \ll R$ . Поэтому временную зависимость наклонной дальности цели можно представить первыми членами разложением квадратного корня в степенной ряд

$$R(t_X) \approx R_0 + \frac{(Vt_X - X_T)^2}{2R_0}, \quad (3.13)$$

где  $R_0$  – наклонная дальность на траверзе в точке, в которой производная  $dR/dt$  и доплеровская частота  $F_{Доп}$  равны нулю (точка с координатами  $\{0, Y_T, Z_T\}$  на рис. 3.2)

$$R_0 = \sqrt{(Z_s - Z_T)^2 + Y_T^2}. \quad (3.14)$$

В зарубежной литературе точку с дальностью  $R_0$  именуют «ближайшей наклонной дальностью» (the nearest slant range).

### Глава 3. Современные методы космического радиолокационного землеобзора ...

В каждом периоде зондирования излучается сигнал

$$\dot{U}_t(t_R) = U_m(t_R)e^{j2\pi f_0 t_R}, \quad (3.15)$$

где  $U_m$  – амплитуда;  $f_0$  – несущая частота;  $t_R$  – «быстрое время».

Начальную фазу зондирующего сигнала примем равной нулю.

Сигнал от одиночной точечной цели, поступающий на вход приемника, будет иметь фазу, определяемую задержкой сигнала на двойное время распространения от РЛС до цели и от цели до РЛС, и амплитуду, смещенную на время распространения и зависящую от ЭПР цели, потерь на распространение до цели и обратно, а также коэффициента усиления антенны в направлении на цель

$$\begin{aligned} \dot{U}_r(t_R, t_X) &= K_R G_{\text{xant}} \left( \frac{Vt_X - X_T}{R_0} \right) U_m \left( t_R - \frac{2R(t_X)}{c} \right) \exp \left\{ j2\pi f_0 \left( t_R - \frac{2R(t_X)}{c} \right) \right\} \approx \\ &\approx K_R G_{\text{xant}} \left( \frac{Vt_X - X_T}{R_0} \right) U_m \left( t_R - \frac{2R(t_X)}{c} \right) \exp \left\{ j2\pi f_0 t_R - j \frac{4\pi R_0}{\lambda} - j2\pi \frac{V^2 (t_X - t_{XT})^2}{R_0 \lambda} \right\}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где  $K_R$  – коэффициент потерь при распространении сигнала до цели и  $G_{\text{xant}}$  – КУ антенны в направлении на цель;  $\lambda = c/f_0$  – длина волны РЛС;  $c$  – скорость света;  $t_{XT} = X_T/V$  – момент времени, когда радиолокатор находится в точке «ближайшей наклонной дальности».

Заметим, что отсчеты «медленного» времени дискретны  $t_X = nT_p$ , где  $n$  – номер зондирующего импульса;  $T_p$  – период зондирования. Строго говоря, текущую наклонную дальность (азимутальный отсчет с номером  $n$ ) можно найти решением параметрического уравнения, учитывающего время распространения излученного сигнала от  $n$ -го положения радиолокатора до цели (дальность  $R_{1n}$ ) плюс время распространения отраженного сигнала от цели до радиолокатора, движущегося со скоростью  $V$  (наклонная дальность  $R_{2n}$ , суммарное время  $\Delta t$ ):

$$R(t_X) = (R_{1n} + R_{2n})/2 = \left( \sqrt{R_0^2 + V^2 (nT_p - t_{XT})^2} + \sqrt{R_0^2 + V^2 (nT_p + \Delta T - t_{XT})^2} \right) / 2$$

и

$$\Delta t = (R_{1n} + R_{2n})/2c.$$

На практике величиной  $\Delta t$  пренебрегают и приближенно считают  $R(t_X) \approx R_{1n}$ .

Учет  $\Delta t$  приведен в подразделе 4.2.4.

После преобразования сигнала в фазовом детекторе приемника на видеочастоту множитель, зависящий от  $f_0$ , будет скомпенсирован, и фаза по синтезированной апертуре будет иметь квадратичную зависимость от времени

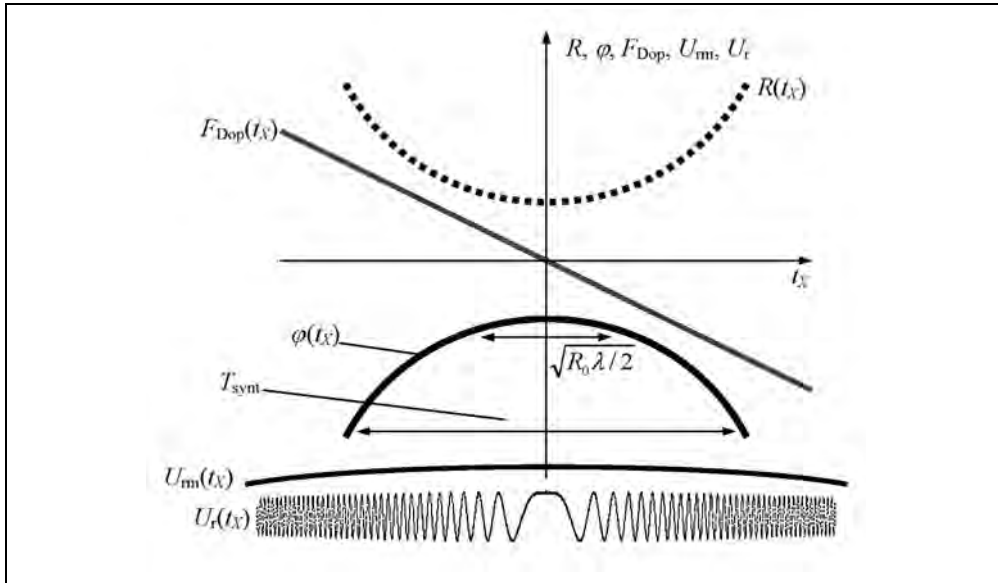
$$\varphi(t_X) = \varphi_0 - 2\pi \frac{V^2 (t_X - t_{XT})^2}{R_0 \lambda} = \frac{4\pi V \alpha_T}{\lambda} t_X - \frac{2\pi V^2}{R_0 \lambda} t_{XT}^2 + \varphi_{XT}, \quad (3.17)$$

где  $\alpha_T \approx Vt_{XT}/R_0 = X_T/R_0$  – угол отклонения цели от центра синтезированной апертуры при  $t_X=0$ , определяющий линейный член в формуле (3.17);  $\varphi_0$  и  $\varphi_{XT}$  – постоянные фазы сигнала по апертуре синтеза.

Частота принимаемого сигнала (доплеровское смещение, вызванное движением РЛС) как производная фазы будет меняться по линейному закону, изменение сигнала по азимуту будет представлять собой ЛЧМ-процесс (принято  $t_{XT}=0$ )

$$F_{\text{Доп}}(t_X) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t_X)}{dt_X} = -\frac{2V^2(t_X - t_{XT})}{R_0\lambda} = -\frac{2V^2 t_X}{R_0\lambda}. \quad (3.18)$$

Временные зависимости параметров сигнала приведены на рис. 3.8.



**Рис. 3.8.** Временные зависимости наклонной дальности  $R$ , фазы  $\varphi$ , доплеровской частоты  $F_{\text{Доп}}$ , амплитуды  $U_{\text{fm}}$  и мгновенного значения сигнала  $U_r$  при прямолинейном движении радиолокатора; по оси абсцисс отложено траекторное время, по оси ординат – условные единицы

Зона облучения антенны  $X_{\text{ant}}$ , равная азимутальному разрешению (3.10) в РБО, определяет полосу доплеровских частот сигнала и максимальное время синтеза в режиме непрерывной съемки (маршрутный режим)

$$\Delta F_{\text{Доп}} = \frac{2VX_{\text{ant}}}{R_0} = \frac{2V}{D_{\text{xant}}}; \quad T_{\text{synt}} \leq \frac{X_{\text{ant}}}{V} = \frac{R_0\lambda}{D_{\text{xant}}V}, \quad (3.19)$$

где  $D_{\text{xant}}$  – горизонтальный раскрыв антенны.

### **Синтез апертуры. Антенный подход**

В литературе по РСА, особенно в ранних публикациях, рассматривали разные подходы для интерпретации процесса синтеза апертуры: доплеровская фильтрация, антенный подход, согласованная фильтрация. Воспользуемся антенным подходом. Преобразуем (3.17) к зависимости фазы от координаты  $X$  по апертуре синтеза

$$\varphi(X) = \frac{4\pi X \alpha_T}{\lambda} - \frac{2\pi X^2}{R_0 \lambda} + \varphi_{XT}. \quad (3.20)$$

Форма синтезированной ДНА при отклонении цели от направления траверза ( $t=0$ ) выражается интегралом Френеля

$$A(\alpha_T) = \left| \int_{-L_a/2}^{L_a/2} A_0 \exp \left\{ j \frac{4\pi X \alpha_T}{\lambda} - j \frac{2\pi X^2}{R_0 \lambda} \right\} dX \right|, \quad (3.21)$$

где  $A_0$  – амплитудное распределение поля по синтезированной апертуре, имеющей размер  $L_a$ .

Сначала пренебрежем квадратичным фазовым членом, что допустимо, если фазовая ошибка на краях синтезированной апертуры не превышает  $\pi/4$ , т.е.

$$L_a < \sqrt{R_0 \lambda / 2}. \quad (3.22)$$

Этот случай синтеза апертуры, когда диаграмма синтезированной антенны формируется в дальней зоне, называется «нефокусированным синтезом»

$$\begin{aligned} A(\alpha_T) &= \left| A_0 \int_{-L_a/2}^{L_a/2} \exp \left\{ j \frac{4\pi X \alpha_T}{\lambda} \right\} dX \right| = \left| A_0 \int_{-L_a/2}^{L_a/2} \cos \left( \frac{4\pi \alpha_T X}{\lambda} \right) dX + j A_0 \int_{-L_a/2}^{L_a/2} \sin \left( \frac{4\pi \alpha_T X}{\lambda} \right) dX \right| = \\ &= A_{\max} \frac{\sin(2\pi \alpha_T L_a / \lambda)}{2\pi \alpha_T L_a / \lambda}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

где  $A_{\max}$  – амплитуда отклика в максимуме ДНА.

Форма синтезированной ДНА

$$G_X(\alpha_T) = \frac{A(\alpha_T)}{A_{\max}} = \frac{\sin(\pi \alpha_T / \alpha_0)}{\pi \alpha_T / \alpha_0}; \quad (3.24)$$

$$G_X(X_T) = \text{sinc}(X_T / \rho_X),$$

где функция  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x$ ;  $\alpha_0 \approx \lambda / 2L_a$  – ширина луча синтезированной ДНА;  $\rho_X \approx R_0 \lambda / 2L_a$  – разрешение по азимуту.

Формулы для ширины луча и разрешения по азимуту отличаются от случая РБО (3.10) для физической антенны с горизонтальным размером  $D_{\text{ант}}$  наличием множителя 2 в знаменателе. Это обусловлено двойным фазовым набегом по синтезированной апертуре. Область нефокусированного синтеза отмечена на рис. 3.8.

Для фокусированного синтеза, учитывающего сферичность облучающей волны, необходима компенсация квадратичного набега фазы по синтезированной апертуре путем умножения подынтегрального выражения в (3.23) на зависящий от

наклонной дальности множитель  $\exp \left\{ j \frac{2\pi X^2}{R_0 \lambda} \right\}$ . Такую процедуру выполняют при

цифровом синтезе РЛИ с применением алгоритмов согласованной фильтрации (см. гл. 6). Переписав (3.21) в виде зависимости от времени  $t_X$  и учтя принятый по апертуре синтеза сигнал, получаем выражение для расчета сигнала на выходе РСА по

азимуту, которое представляет собой свертку входного сигнала по траектории полета  $\dot{U}_r(t_X)$  с комплексно сопряженной опорной функцией  $\exp\left\{j\frac{2\pi V^2}{R_0\lambda}t_X^2\right\}$ , реализующей согласованную фильтрацию принятого сигнала (для простоты рассмотрения не учитываем дискретности  $t_X$  и записываем интегральную сумму)

$$\dot{U}_{out}(t_{XT}) = \int_{-T_{synt}/2}^{T_{synt}/2} \dot{U}_r(t_X - t_{XT}) \exp\left\{j\frac{2\pi V^2}{R_0\lambda}t_X^2\right\} dt_X. \quad (3.25)$$

В общем случае согласованной фильтрации принятого сигнала с учетом параметров движения радиолокатора и влияния других факторов *разрешающая способность РСА по азимуту* определяется выражением

$$\rho_X = \frac{R\lambda}{2L_{synt}}, \quad (3.26)$$

где  $L_{synt}$  – длина синтезированной апертуры.

В обычном маршрутном (с непрерывной съемкой) режиме бокового обзора длина апертуры  $L_{synt}$  не может превышать размеров области облучения  $X_{ant}$ . В этом предельном случае разрешающая способность РСА по азимуту равна половине горизонтального размера антенны  $\rho_X = D_{xant}/2$  и не зависит от дальности наблюдения. На практике существуют методы получения азимутального разрешения лучше, чем  $D_{xant}/2$  – так называемые, прожекторный режим, режим двойного приема. Они рассмотрены в гл. 4.

**Особенность формирования РЛИ высокого разрешения.** Приведенная в формуле (3.16) зависимость огибающей сигнала от траекторного времени  $U_m(t_R - 2R(t_X)/c)$  может приводить к ее смещению на много элементов разрешения по наклонной дальности. Этот эффект, называемый *миграцией дальности* (range migration), требует учета при синтезе РЛИ, значительно усложняя алгоритмы синтеза (см. гл. 6).

### **3.3. Геометрия обзора при скошенном и бистатическом режимах съемки**

#### **3.3.1. Геометрические соотношения в режиме скошенного обзора**

В перспективных космических РСА могут применяться режимы не только бокового, но и скошенного обзора (squint mode), в которых плоскость визирования разворачивают относительно нормали к вектору путевой скорости, т.е. относительно направления бокового обзора. Малые углы скоса (до  $\pm 5^\circ$ ) встречаются при ориентации осей КА не в гринвичской (путевой) системе координат, как это принято в современных космических РСА, а в орбитальной системе координат (когда спутник стабилизирован в плоскости орбиты). Работа с большими углами скоса (до  $\pm 60^\circ$ ) может использоваться для повышения оперативности съемки в прожекторном режиме, а также для

высокоорбитальных РСА и для получения радиолокационных портретов объектов в разных ракурсах с целью их лучшего распознавания. В литературе вместо термина «скошенный обзор» используют также названия «передне-боковой обзор» или «задне-боковой обзор». Геометрия скошенного обзора в момент времени  $t=0$  показана на рис. 3.9.

Плоскость визирования из бокового обзора  $OST_0$  поворачивают вокруг радиус-вектора КА  $OS$  на угол  $\psi$  в положение  $OST$ . При этом в момент времени  $t=0$  луч антенны направляется в упрежденную точку  $T$ . Дуга  $Y_0$  с центральным углом  $\alpha_{y0}$  переходит в дугу  $Y$  с углом  $\alpha_y$ . Из треугольников  $F_0OT_0$  и  $F_TOT$  с учетом того, что отрезок  $T_0T'$  – вертикаль, а  $T'T$  параллелен вектору путевой скорости и перпендикулярен плоскости  $OST_0$ , имеем соотношения

$$\alpha_{y0} = Y_0/R_e; \quad F_0T_0 = F_T T' = R_e \sin \alpha_{y0}; \quad (3.27)$$

$$F_T T = F_0T_0/\cos \psi = R_e \sin \alpha_{y0}/\cos \psi = R_e \sin \alpha_y. \quad (3.28)$$

Откуда

$$\alpha_y = \arcsin(\sin \alpha_{y0}/\cos \psi), \quad \gamma = \arcsin\left(\frac{\sin \gamma_{i0}}{\cos \psi}\right) \quad (3.28)$$

$$\gamma_i = \arcsin\left(\frac{\sin \gamma_{i0}}{\cos \psi}\right) - \alpha_y = \arcsin\left(\frac{\sin \gamma_{i0}}{\cos \psi}\right) - \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_{y0}}{\cos \psi}\right), \quad (3.29)$$

$$R = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos(\arcsin(\sin Y_0/R_e \cos \psi))}, \quad (3.30)$$

где параметры  $\alpha_{y0}$ ,  $\gamma_{i0}$  соответствуют случаю строгого бокового обзора с удалением  $Y_0$  точки наблюдения от следа КА.

Переход в РСА от бокового обзора к скошенному обзору иллюстрирует рис. 3.10, на котором для наглядности Земля изображена плоской, что допустимо в случае низковысотных (до 1000 км) РСА. Примем, что изменение положения зоны облучения земной поверхности реализуется путем двух движений – удалением центра зоны  $T_0$  от трассы полета в положение  $T_1$  и поворотом плоскости визирования  $SFT_1$  на угол  $\psi$  в положение  $SFT$ . В результате возрастает наклонная дальность  $R$  (с соответствующими изменениями угла падения и ухудшением энергетического потенциала), изменяется длина синтезированной апертуры, а ее синтез реализуется в скошенном режиме с углом  $\psi_L$  в плоскости  $ST_0T$ . Разрешение поперек линии пути находим дифференцированием ф-лы (3.30) по  $Y$

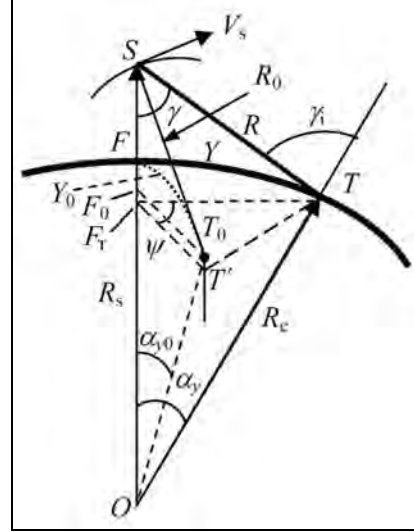


Рис. 3.9. Геометрия обзора поперек трассы движения КА при скошенном обзоре

$$\rho_Y = \rho_R : \frac{dR}{dY} \approx \frac{R\rho_R}{R_s \sin(Y_0/R_e) \cos\psi} = \frac{\rho_{Y0} \sin \gamma_{i0}}{\sin \gamma_i \cos\psi} \approx \frac{\rho_{Y0}}{\cos\psi}. \quad (3.31)$$

Перемещение облучающего пятна для скошенного обзора обеспечивается поворотом КА по курсу, тангажу или электронным способом, используя ФАР. В зависимости от этого сечение луча вдоль линии пути, определяющее длину апертуры синтеза, может возрасти пропорционально наклонной дальности (3.30) или больше – для пятна эллиптической формы, вытянутого по дальности, при его повороте по курсу или в случае электронного сканирования в ФАР. Длину синтезированной апертуры определяет выражением, в котором коэффициент  $q$  учитывает особенности изменения геометрии пятна, облучающего земную поверхность,

$$L_a = \frac{R\lambda}{D_{\text{xant}} \cos^q \psi} = \frac{R_0\lambda}{D_{\text{xant}} \cos\psi_L \cos^q \psi} = \frac{R_0\lambda}{D_{\text{xant}} \cos^{2q} \psi}, \quad (3.32)$$

где  $\psi_L = \arctg\left(\frac{\tg\psi}{\sin\gamma_0}\right)$  – угол между векторами  $ST_0$  и  $ST$  на рис. 3.10.

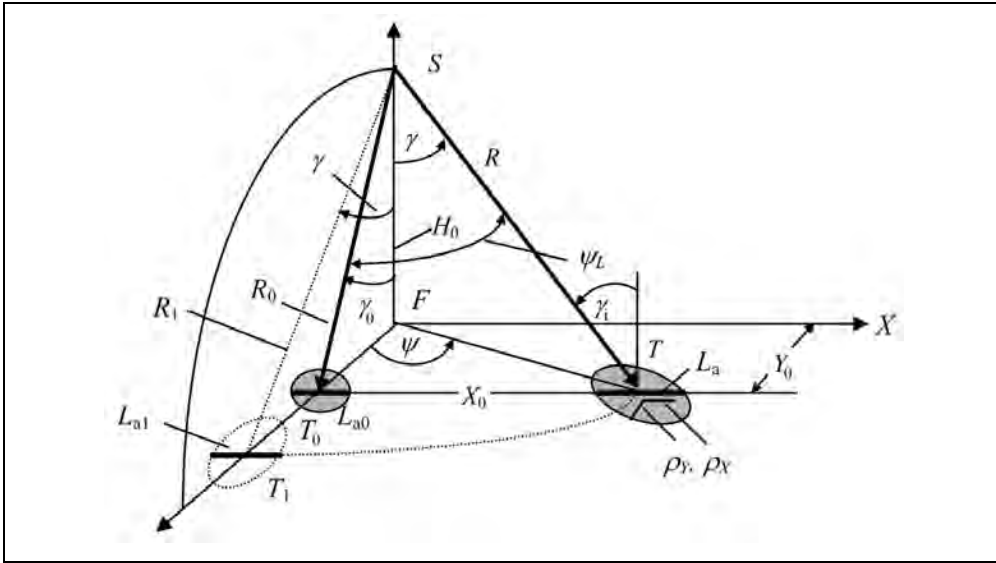


Рис. 3.10. Зоны облучения антенной радиолокатора при режимах бокового и скошенного обзора

Для самолетных РСА с малым отношением высоты к горизонтальной дальности при  $\gamma_0 \approx 90^\circ$  имеем  $\psi_L \approx \psi$ .

Геометрия синтеза апертуры в скошенном режиме показана на рис. 3.11. Истинная длина апертуры  $L_a$  проектируется на нормаль к направлению визирования, образуя эффективную длину апертуры  $L_{\text{eff}}$ . Ширина синтезированного луча в этом направлении определяется известной формулой для РСА

$$\alpha_{\text{xant}} = \lambda/2L_{\text{eff}} = \lambda/2L_a \cos\psi_L. \quad (3.33)$$

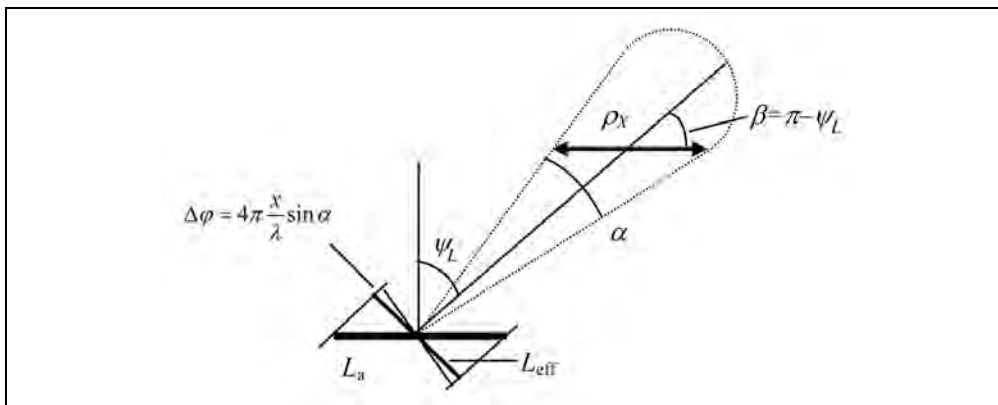


Рис. 3.11. Геометрия скошенного синтеза апертуры

Расширение синтезированного луча обусловлено уменьшением полосы спектра доплеровских частот сигнала, принимаемого при скошенном обзоре. Разрешение вдоль линии пути определяется сечением синтезированного луча под углом  $\beta = \pi - \psi_L$  к оси луча (а не поперек луча, как при боковом обзоре)

$$\rho_x = \frac{R\lambda}{2L_{\text{eff}} \cos \psi_L} = \frac{D_{\text{xant}}}{2 \cos \psi_L}. \quad (3.34)$$

Проведенное моделирование показало, что, например, при угле падения  $45^\circ$  и угле скоса  $35^\circ$  ухудшение разрешения РСА по азимуту при скошенном обзоре не превышает 16%, но возможно возрастание боковых лепестков синтезированной ДНА.

### 3.3.2. Многопозиционные космические системы радиолокационного землеобзора

Принцип действия многопозиционных систем радиолокационного наблюдения наземных объектов заключается в разделении передающей аппаратуры («передатчик подсвета») и набора пассивных приемников. Используются также комбинированные режимы моностатического РСА в сочетании с пассивными приемными РСА на спутниках, движущихся по близким орбитам, как это предусмотрено в тандемах РСА TerraSAR-X и Radarsat-2/3 [276, 317, 330, 370, 372]. Также перспективно использовать аэрокосмические многопозиционные системы с пассивными приемниками, размещенными на спутниках, самолетах и БЛА.

**Многопозиционные космические РСА имеют следующие преимущества:**

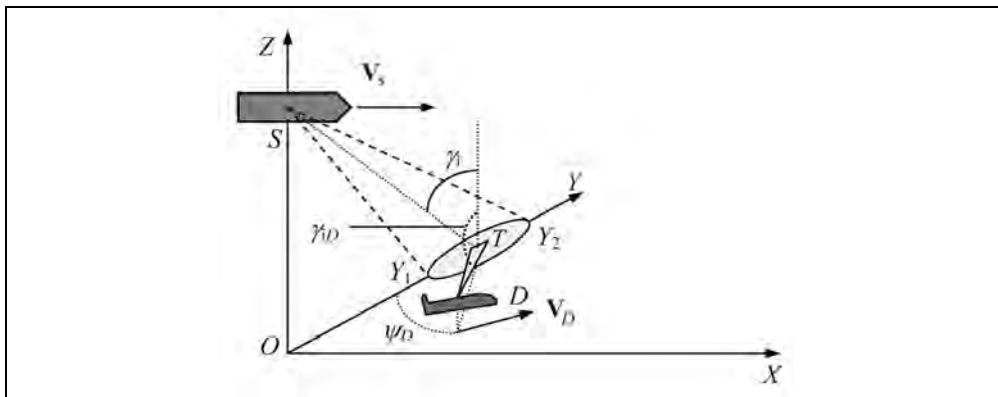
- получение высокоточных цифровых карт рельефа местности, а также трехмерных изображений объектов методами одновременной интерферометрии поперек линии пути КА при оптимальном размере интерферометрической базы, поддерживаемой путем соответствующего управления орбитами КА (тандемы КА);
- возможность одновременного наблюдения объекта под разными ракурсами, что повышает вероятность его обнаружения и распознавания;



### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

- индикация наземных целей, двигающихся с малыми радиальными скоростями, методом интерферометрии вдоль линии пути КА с четырьмя фазовыми центрами антенн (обеспечивается тандемами РСА с выбором смещения орбит КА вдоль и поперек линии пути);
- поляриметрическая интерферометрия;
- многократное некогерентное накопление;
- повышенная помехозащищенность системы разведки, особенно при построении аэрокосмической системы с легкими приемными устройствами на БПЛА, что значительно повышает оперативность разведки при сопровождении военных операций. В ситуации, когда состав длительно функционирующей космической группировки, включающей пассивные датчики, разведан по косвенным признакам (например, синхронность передачи больших потоков информации), создание ограниченного набора станций помех, следящих за спутниками, не является сложной технической проблемой. Поэтому, включение в систему наблюдения мобильных летательных аппаратов с приемными РСА обеспечит скрытность получения разведывательной информации.

Принципиально многопозиционные и, как частный случай, бистатические системы могут иметь совпадающую геометрию наблюдения, когда передатчик и приемник находятся по одну сторону от точки наблюдения (рис. 3.12), и с оппозитной геометрией, когда прием ведется по другую сторону от передатчика. На рис. 3.12, где  $Y_1Y_2$  – зона подсвета от КА;  $T$  – центр зоны приема самолетным РСА;  $\gamma_i$  – угол падения облучающей волны;  $\gamma_D$  – угол падения приемной волны;  $\psi_D$  – угол поворота плоскости приема. Показан случай, как при боковом обзоре, когда подсвечивающий луч антенны передатчика и луч приемного датчика устанавливаются в плоскостях, нормальных, соответственно, вектору путевой скорости КА  $V_s$ , или вектору скорости приемного датчика  $V_D$ . В общих случаях такая геометрия не обязательна.



**Рис. 3.12.** Геометрия бистатического обзора с совпадающими направлениями наблюдения:  $Y_1Y_2$  – зона подсвета от КА;  $T$  – центр зоны приема самолетным РСА;  $\gamma_i$  – угол падения облучающей волны;  $\gamma_D$  – угол падения приемной волны;  $\psi_D$  – угол поворота плоскости приема

Положение передатчика подсвета в геоцентрической гринвичской системе координат характеризуется координатами  $X_S Y_S Z_S$ . Положение приемного датчика определяется координатами  $X_D Y_D Z_D$ . Наклонная дальность облучения  $R$  цели  $T$  с координатами  $X_T Y_T Z_T$  и дальность приема отраженного сигнала  $R_D$  характеризуются формулами

$$R = \sqrt{(X_T - X_S)^2 + (Y_T - Y_S)^2 + (Z_T - Z_S)^2}, \quad (3.35)$$

$$R_D = \sqrt{(X_T - X_D)^2 + (Y_T - Y_D)^2 + (Z_T - Z_D)^2}. \quad (3.36)$$

Одна из важнейших проблем при бистатическом зондировании состоит в синхронизации движений передающего и приемного модулей. Согласование геометрии обзора обеспечивается прогнозными траекторными измерениями с их корректировкой по аппаратуре GPS, установленной на обоих датчиках. Для временной синхронизации возможно применение кодированных синхросылок, использование прямого сигнала от передатчика, восстановление строчной структуры данных в процессе синтеза РЛИ. Когерентность сигналов обеспечивается применением высокостабильных опорных генераторов.

Взаимное расположение облучающей и приемной волн характеризуется углами: направление облучения – углом падения облучающей волны  $\gamma$ , направление приема рассеянного излучения – углом падения  $\gamma_D$ , отсчитываемым от местной вертикали в точке наблюдения, и углом  $\psi_D$  поворота плоскости приема.

Указанные выше параметры бистатического обзора учитываются при расчете энергетического потенциала РСА, включая оценку УЭПР отражающей местности при углах наблюдения  $\gamma_D$  и  $\psi_D$ , отличных от угла падения при моностатическом обзоре.

При работе в режиме тандема двух КА можно обеспечить оптимальную «мягкую» интерференционную базу (от 200 м до 1 км в зависимости от диапазона волн РСА), значительно превышающую размеры «жесткой» базы (60 м), реализованной в бортовом комплексе SIR-C/X-SAR SRTM космического корабля Space Shuttle [521]). При этом повышается точность вычисления карт рельефа местности, а также точность измерения скорости движущихся объектов за счет «мягкой» базы вместо разделения приемной ФАР на две секции по азимуту (см. подраздел 4.2.4).

Для режима тандема координаты обоих КА должны быть близкими и различаться на величину интерферометрической базы, образуемой интервалом времени задержки положения на орбите (вдоль орбиты) и смещением географического положения узла орбиты второго КА. Соответственно  $R \sim R_D$ ,  $\gamma_D \sim \gamma$ ,  $\psi_D = 0$ . В этих условиях разрешающая способность (и другие параметры) получаемых РЛИ близки.

При образовании сложной орбитальной группировки для многопозиционного зондирования разрешающая способность бистатического РЛИ будет зависеть от геометрии обзора

$$\rho_Y = \frac{c\tau_c}{\sin \gamma_i + \sin \gamma_{iD} / \cos \psi_D}, \quad (3.37)$$

где  $\tau_c = 1/\Delta F$  – длительность сжатого импульса, обратно пропорциональная ширине спектра зондирующего сигнала.

Разрешающая способность по азимуту определяется через наклонную дальность до приемного датчика и время синтеза, которое для аэрокосмической системы может быть ограничено временем пролета спутником зоны, облучаемой передающей антенной

$$T_{\text{synt}} = \frac{R\lambda}{D_a V_{\text{sg}}}, \quad (3.38)$$

$$\rho_X = \frac{R_D \lambda}{V_D T_{\text{synt}}}, \quad (3.39)$$

где  $V_{\text{sg}}$  – скорость следа КА на поверхности Земли.

### 3.3.3. Геометрия обзора при бистатическом квазизеркальном космическом режиме съемки

Для глобального мониторинга океанских явлений широкие возможности дает применение оппозитного бистатического зондирования, использующего наклонное «квазизеркальное» зондирование поверхности океана, при котором РСА принимает сигналы от «радиолокационного блика», образованного «подсветом» поверхности с передающего космического аппарата. Геометрия такого оппозитного бистатического обзора показана на рис. 3.13.

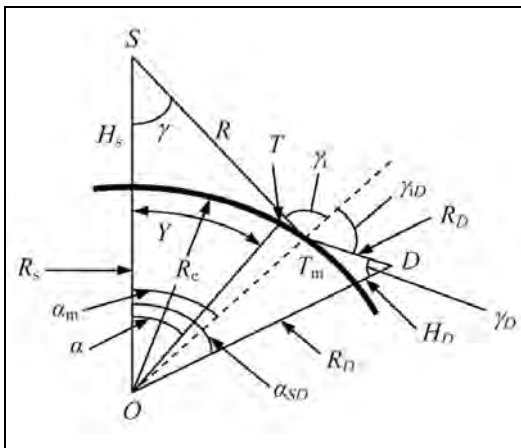


Рис. 3.13. Геометрия бистатического квазизеркального обзора

Пусть заданы высоты орбит передающего  $H_s$  и приемного  $H_D$  КА и текущий центральный угол  $\alpha_{SD}$  между подспутниковыми точками. Точка зеркального отражения  $T_m$  между передающим КА  $S$  и приемным КА  $D$  будет удалена от обоих КА с наклонными дальностями  $R$  и  $R_D$ , обеспечивающими равенство углов падения  $\gamma_i$  и отражения  $\gamma_D$ .

В оппозитной системе в области квазизеркального приема разрешающая способность резко ухудшается. Она определяется большим пятном (бликом) на наблюдаемой поверхности. Положение зеркальной точки  $T_m$  (центральный угол  $\alpha_m$ ) находят из следующих уравнений при  $\gamma_D = \gamma_i$

$$\frac{\sin \gamma_i}{R_e + H_s} = \frac{\sin \alpha_m}{R} = \frac{\sin(\gamma_i - \alpha_m)}{R_e}, \quad (3.40)$$

$$\frac{\sin \gamma_{iD}}{R_e + H_D} = \frac{\sin(\alpha_{SD} - \alpha_m)}{R} = \frac{\sin(\alpha_{SD} - \alpha_m - \gamma_D)}{R_e}.$$

**Глава 3. Современные методы космического радиолокационного землеобзора ...**

При равной высоте орбит обоих спутников имеем для углов падения и отражения

$$\gamma_i = \gamma_{iD} = \arcsin\left(\frac{R_s}{R} \sin(\alpha_{SD}/2)\right), \quad (3.41)$$

где  $R_s = R_e + H_s$  – радиус орбит КА;  $R = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos(\alpha_{SD}/2)}$  – наклонная дальность от каждого из КА до точки зеркального отражения.

Суммарная наклонная дальность определится формулой

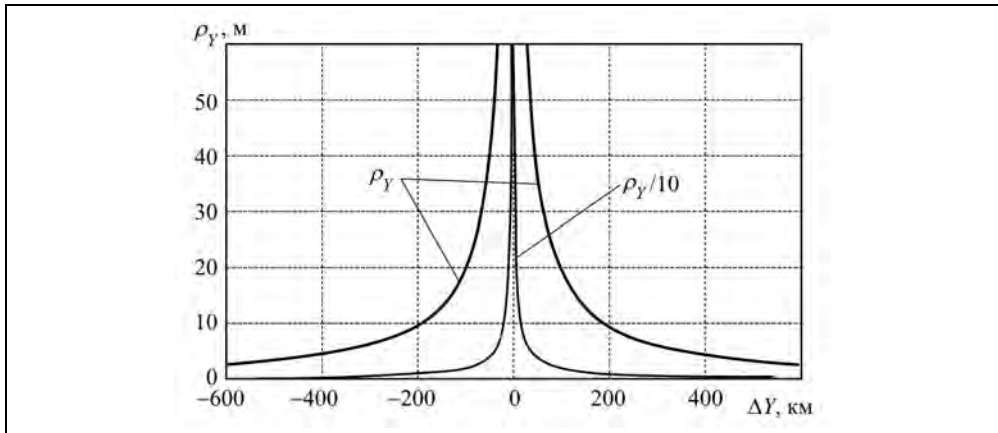
$$R_{SD}(\Delta Y) = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos\left(\frac{\alpha_{SD}}{2} - \frac{\Delta Y}{R_e}\right)} + \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos\left(\frac{\alpha_{SD}}{2} + \frac{\Delta Y}{R_e}\right)}, \quad (3.42)$$

где  $\Delta Y$  – приращение горизонтальной дальности (по дуге большого круга) относительно зеркальной точки.

Разрешающую способность бистатического РСА в зависимости от удаления текущей точки от зеркальной точки можно определить, решая уравнение относительно  $\rho_Y$  при заданном разрешении РСА по наклонной дальности  $\rho_R$

$$\rho_R = R_{SD}(\Delta Y + \rho_Y(\Delta Y)) - R_{SD}(\Delta Y). \quad (3.43)$$

На рис. 3.14 приведена зависимость разрешения по горизонтальной дальности от удаления текущей точки от зеркальной точки при высоте орбит обоих КА 800 км, их удаления друг от друга на 2000 км. Угол падения для зеркальной точки равен  $60^\circ$ , полоса зондирующего сигнала 300 МГц (разрешение по наклонной дальности 0,5 м).



**Рис. 3.14.** Зависимость разрешения по горизонтальной дальности от удаления текущей точки от зеркальной точки  $H_s=H_D=800$  км. Масштаб тонкой кривой уменьшен в 10 раз

### 3.3.4. Бистатический режим обзора с подсветом от передающей РЛС на геостационарной орбите

Определенные перспективы и преимущества перед низкоорбитальной космической группировкой для зондирования океана имеет сочетание подсвета с КА на геостационарной орбите с системой низкоорбитальных спутников [182, 183\*]. Геометрия обзора показана на рис. 3.15. Задавая значения радиусов орбит передающего КА  $R_{ст} = 42164$  км и приемных датчиков  $R_{D1}$ ,  $R_{D2}$  в формулах (3.40), (3.42) и (3.43), можно рассчитать зависимость разрешения по горизонтальной дальности от удаления текущей точки от зеркальной точки.

На рис. 3.16 приведена зависимость разрешения по горизонтальной дальности от расстояния относительно точки зеркального отражения при квазизеркальном бистатическом обзоре с подсветом от РЛС на геостационарной орбите. Высота орбит приемных КА – 800 км.

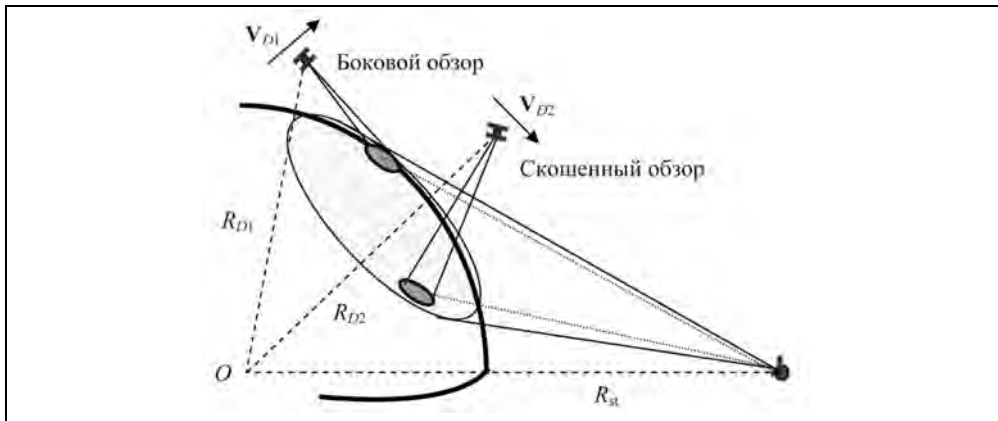


Рис. 3.15. Геометрия бистатического обзора с подсветом от РЛС на геостационарной орбите

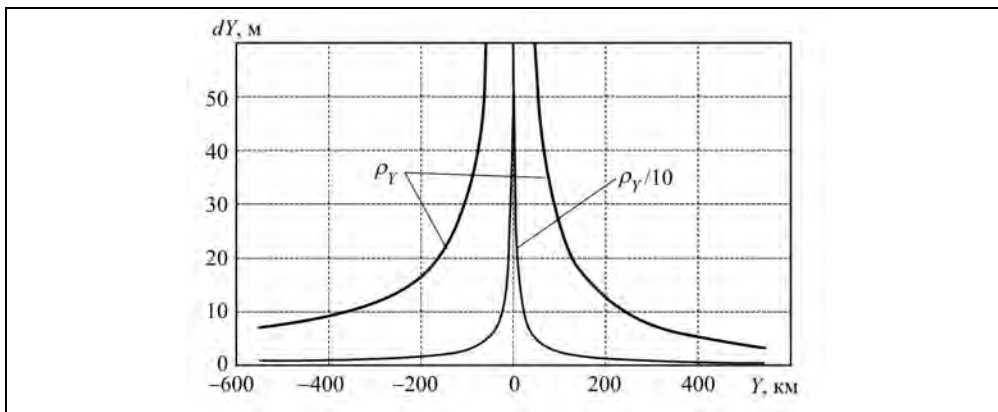


Рис. 3.16. Разрешение по горизонтальной дальности при квазизеркальном бистатическом обзоре с подсветом от РЛС на геостационарной орбите (масштаб тонкой кривой уменьшен в 10 раз)

### 3.4. Энергетические характеристики космических радиолокаторов землеобзора

Мощность принимаемого РСА сигнала вычисляют с помощью уравнения радиолокационной дальности [54, 214]. Одна из форм записи этого уравнения в виде произведения трех сомножителей характеризует физические процессы при распространении, рассеянии и приеме сигналов

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} \frac{S_{\text{eff}}}{L}, \quad (3.44)$$

где  $P_t$  – излучаемая мощность;  $G$  – коэффициент усиления (КУ) антенны;  $R$  – наклонная дальность;  $\sigma$  – эффективная площадь наблюдаемой цели;  $S_{\text{eff}}$  – эффективная площадь антенны;  $L$  – суммарные потери при двойном распространении сигнала (в тропосфере, ионосфере, а также в растительности при обнаружении объектов сквозь листву и др).

Если не рассматривать потери в трассе распространения сигнала, то первый сомножитель представляет собой плотность потока мощности излучения на расстоянии  $R$  от РЛС. Числитель второго сомножителя  $\sigma$  – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) цели – определяет долю отраженного сигнала в направлении РЛС, а его знаменатель учитывает распределение электромагнитной энергии в пространстве на расстоянии  $R$  от цели, т.е. у РЛС. Произведение первого и второго сомножителей определяет плотность потока мощности отраженного сигнала в раскрыве приемной антенны РЛС. Будучи умноженным на эффективную площадь антенны, это произведение определяет мощность сигнала от цели на входе приемника.

К эхо-сигналу от местности добавляются собственные (тепловые) шумы аппаратуры. Так же, как и сигнал от местности, они представляют собой случайный процесс, только с очень широким спектром частот. Приемник выделяет из спектра полосу, соответствующую своей полосе пропускания. В классической теории радиолокации, рассматривающей задачу обнаружения точечных целей на фоне шумов приемника, обычно оценивают отношение сигнал/шум по мощности для двух сечений радиолокационного тракта: на входе детектора огибающей и после некогерентного накопления (последетекторная фильтрация).

Применительно к РБО и РСА, предназначенным для наблюдения протяженных объектов, характеризуемых удельной эффективной поверхностью рассеяния (УЭПР)  $\sigma^0$ , влияние шумов приемника характеризуют параметром  $\sigma_{\text{не}}^0$  ( $\sigma^0$  шумового эквивалента – NESZ – noise equivalent sigma zero). Это такое значение УЭПР фона местности, который создает на выходе приемника (или синтезированного РЛИ) мощность, численно равную мощности шумов приемника. Влияние последетекторного некогерентного накопления оценивается отдельно как параметр, обеспечивающий улучшение радиометрического разрешения или изменение кривых вероятности обнаружения компактных объектов.

Значение  $\sigma_{\text{не}}^0$ , характеризующее чувствительность РБО или РСА, вычисляют по формуле (учтено, что  $S_{\text{eff}} = G\lambda^2/4\pi$ )

$$\sigma_{\text{не}}^0 = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_n L}{P_t G^2 \lambda^2 \rho_X \rho_Y}, \quad (3.45)$$

где  $\rho_X, \rho_Y$  – разрешение на местности для рассматриваемых сечений тракта РБО или РСА;  $\rho_X \times \rho_Y$  – площадь элемента разрешения на местности;  $L$  – суммарные потери в тракте распространения сигнала (без проникновения в листву);  $P_n$  – мощность шумов на входе приемника, определяемая выражением

$$P_n = k \Delta F [T_s + T_0 (F_n - 1)] = 4 \cdot 10^{-21} \Delta F F_n. \quad (3.46)$$

Здесь  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц °К – постоянная Больцмана,  $T_0$  – абсолютная температура приемной системы,  $T_s$  – абсолютная температура источника сигнала (для РЛС обзора земной поверхности принимают  $T_s = T_0 = 290^\circ\text{K}$ ),  $\Delta F$  – полоса пропускания приемника,  $F_n$  – шумфактор приемника.

Значения излучаемой мощности и шумов приемника относятся к фланцу антенны. Потери в антенном тракте учитывают в значении коэффициента усиления (или эффективной площади антенны).

Заметим, что для разных сечений трактов РБО или РСА (вход приемника, когерентная обработка – сжатие по дальности для РБО и РСА или синтез РЛИ для РСА) значения разрешающей способности  $\rho_X, \rho_Y$  могут быть разные, но величина  $\sigma_{\text{не}}^0$  остается постоянной. Это связано с тем, что сжатие сигнала по дальности и/или азимуту приводит к уменьшению площади разрешаемого элемента и пропорционально уменьшает его ЭПР. Отношение сигнал/шум+фон по уменьшенной ЭПР от фона местности сохраняется. Напротив, для малоразмерных целей оно возрастает с увеличением коэффициента сжатия сигнала и уменьшением площади фона.

При расчетах энергетического потенциала по формулам уравнения дальности (3.44)–(3.46) обычно принимают, что в случае простого зондирующего импульса излучаемая мощность равна импульсной  $P_t = P_{\text{имп}}$ . Для широкополосных ЛЧМ- или ФМ-импульсов принимают  $P_t = P_{\text{имп}} k_c$ , где  $k_c = \Delta F \tau$  – коэффициент сжатия по дальности при полосе сигнала  $\Delta F$  и длительности импульса  $\tau$ . Можно также ввести отдельные обозначения для разрешения на местности до сжатия по дальности  $\rho_{Y1}$  и азимуту  $\rho_{X1}$  и после синтеза РЛИ со сжатием по дальности  $\rho_Y = \rho_{Y1}/k_c$  и по азимуту  $\rho_X = \rho_{X1}/N_{\text{synt}}$ , где  $N_{\text{synt}}$  – число когерентно суммируемых импульсов по азимуту.

Соотношения (3.44)–(3.46) позволяют по заданному значению чувствительности  $\sigma_{\text{не}}^0$  РБО или РСА вычислить требуемую импульсную мощность  $P_{\text{имп}}$  и среднюю мощность  $P_{\text{ср}}$

$$P_{\text{имп}} = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_n L}{\sigma_{\text{не}}^0 G^2 \lambda^2 \rho_{Y1} \rho_{X1}} = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_n L}{\sigma_{\text{не}}^0 G^2 \lambda^2 k_c \rho_Y \rho_X N_{\text{synt}}}; \quad (3.47)$$

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{имп}} \left( \frac{\tau}{T_p} \right).$$

По значениям импульсной и средней мощностей с учетом выбранного типа передающего устройства и допустимой скважности для выходного усилителя мощности задают длительность зондирующего импульса  $\tau$  и вычисляют коэффициент сжатия зондирующего сигнала по длительности  $k_c = \Delta F \tau$ .

### 3.5. Радиометрическое разрешение в радиолокаторах землеобзора

#### 3.5.1. Радиометрическое разрешение в РБО

Пространственно-протяженные объекты (например, фон местности или групповые объекты) при облучении их радиоволнами создают рассеянное излучение, часть которого перехватывается приемной антенной РЛС (рис. 3.17). Каждый участок фона представляет собой хаотический набор элементарных отражателей и по-разному ориентированных. В пределах каждого элемента разрешения РЛС происходит векторное суммирование сигналов от этих элементарных отражателей и формируется суммарный сигнал, причем, как правило, доля энергии каждого отражателя много меньше суммарной энергии в элементе разрешения. Сигнал, принимаемый РЛС от данного элемента разрешения, будет иметь случайное значение ЭПР, которое может изменяться от ракурса наблюдения, от элемента к элементу или от захода к заходу съемки в несколько раз. Похожее явление происходит и при зондировании сверхширокополосными сигналами с их когерентной обработкой (согласованной фильтрацией) до тех пор, пока размер разрешаемого элемента превышает размер неоднородностей наблюдаемого объекта (поверхности).

Для радиолокационных изображений характерно наличие спекл-шума, обусловленного узкополосностью зондирующего сигнала (малое отношение  $\Delta F/f_0$ ). Такое же явление наблюдается в оптическом диапазоне волн при освещении узкополосным лазерным излучением поверхностно распределенных объектов.

Сравним два случая, представленных на рис. 3.18: наблюдение при освещении источником белого света с широким спектром (диапазон длин волн  $\lambda_{\text{light}} = 390 \dots 770$  мкм) и монохроматический подсвет лазерным источником ( $\lambda_{\text{laser}} \sim 700$  мкм), аналогичный узкому спектру одночастотного радиолокационного наблюдения.

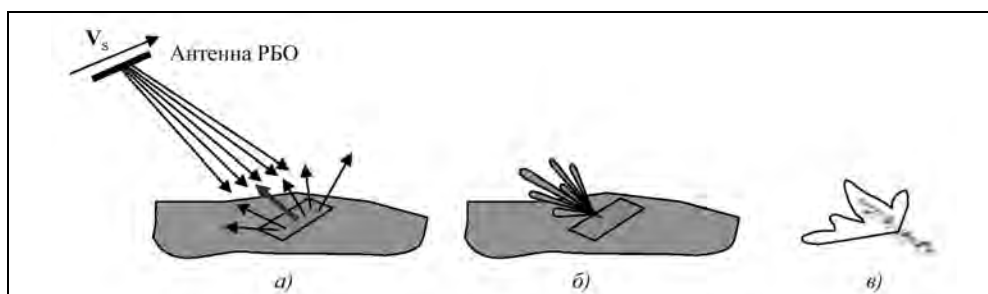


Рис. 3.17. Формирование диаграммы обратного рассеяния от шероховатой поверхности (а, б) и от группового объекта – корабля (в)



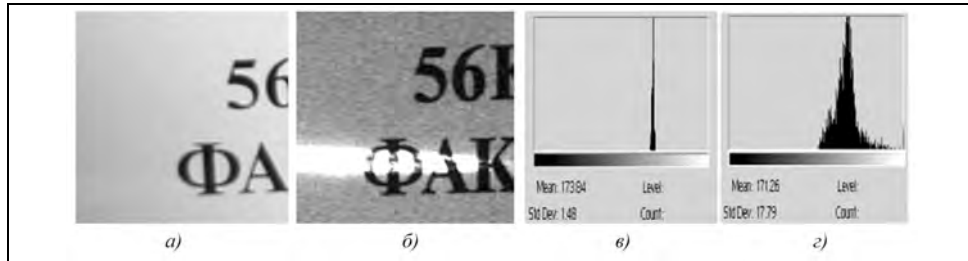


Рис. 3.18. Обложка книги, снятая в белом свете (а) и в свете лазера (б) и соответствующие гистограммы яркости (в, г) (СКО флуктуаций яркости различаются в 12 раз)

Диаграмма обратного рассеяния (ДОР) от распределенных объектов при радиолокационном наблюдении (а также лазерном подсвете) имеет многолепестковую структуру, причем угловая ширина лепестка пропорциональна отношению длины волны к размерам элемента разрешения (или размерам группового объекта, если он меньше элемента разрешения). В частности, для ДОР по азимуту будем иметь

$$\alpha_x \approx \frac{\lambda}{X_a}, \quad (3.48)$$

где  $X_a = \rho_x$  – азимутальное разрешение РБО или размер группового объекта по азимуту.

Сигнал, принятый от однородной шероховатой поверхности, является гауссовым процессом, к которому добавляются шумы приемника. Сигнал на выходе линейного амплитудного детектора  $A$  распределен по закону Релея:

$$p(A) = \frac{A}{u_{sq}^2} \exp\left\{-\frac{A^2}{2u_{sq}^2}\right\}, \quad (3.49)$$

где  $u_{sq}^2$  – дисперсия процесса (квадрат среднеквадратичного отклонения) на входе детектора, определяемая средней ЭПР данного элемента, шумами приемника и коэффициентом передачи сквозного тракта РБО  $Q$ :

$$u_{sq}^2 = Q\sigma_{sn}^0 = Q(\sigma^0 + \sigma_{ne}^0), \quad (3.50)$$

где  $\sigma_{sn}^0 = \sigma^0 + \sigma_{ne}^0$  – эквивалентное значение УЭПР, определяемое суммарным процессом фон + шум, включающим сигнал, отраженный от наблюдаемой местности с УЭПР  $\sigma^0$  и шумы приемника, характеризуемые значением шумового эквивалента  $\sigma_{ne}^0$ .

В практике обработки сигналов в РБО и РСА обычно применяют не амплитудный (линейный), а квадратичный (энергетический) детектор, выходной сигнал которого  $E=A^2$  пропорционален мощности процесса на входе детектора или значению суммарной УЭПР для данного элемента разрешения на местности. Для квадратичного детектора выходной сигнал имеет экспоненциальное распределение

$$p(E) = \frac{1}{2u_{sq}^2} \exp\left\{-\frac{E}{2u_{sq}^2}\right\}. \quad (3.51)$$

**Глава 3. Современные методы космического радиолокационного землеобзора ...**

С учетом формулы (3.50) плотность распределения отсчетов (однократных наблюдений) суммарной УЭПР фон+шум

$$p(z) = \frac{1}{\sigma_{\text{sn}}^0} e^{-\frac{z}{\sigma_{\text{sn}}^0}}, \quad (3.52)$$

где  $z$  – случайное значение суммарной УЭПР фон+шум, определяемое процессом на выходе квадратичного детектора при однократном наблюдении.

При движении радиолокатора изменяется ракурс наблюдения данного элемента разрешения, что приводит к флуктуациям принятого сигнала. При усреднении принимаемого сигнала (последетекторное некогерентное накопление) дисперсия флуктуаций выходного процесса уменьшается обратно пропорционально числу независимых наблюдений в каждом элементе разрешения  $N$ . Плотность распределения отсчетов УЭПР будет подчиняться закону  $\chi^2$ -распределения с  $2N$  степенями свободы, который в нормированном виде находят по формуле [154\*, 160\*, 163\*, 295]

$$p_N(z) = \frac{N^N}{\sigma_{\text{sn}}^0 (N-1)!} e^{-\frac{Nz}{\sigma_{\text{sn}}^0}} \left( \frac{z}{\sigma_{\text{sn}}^0} \right)^{N-1}. \quad (3.53)$$

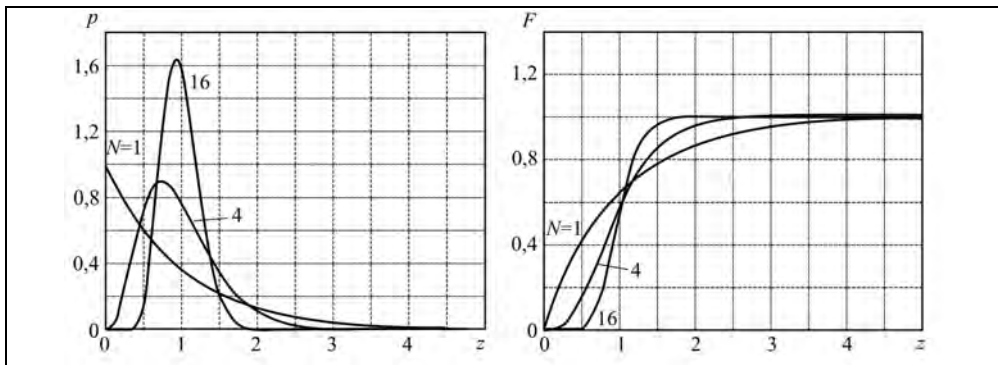
При больших  $N$  плотность вероятности приближается к гауссову закону [1]:

$$p_N(z) = \frac{1}{\sigma_{\text{sn}}^0} \sqrt{\frac{N}{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}N \left( \frac{z}{\sigma_{\text{sn}}^0} - 1 \right)^2}. \quad (3.54)$$

Среднее значение, дисперсия и среднеквадратичное отклонение (СКО) отсчетов УЭПР соответственно

$$M_1\{z\} = \sigma_{\text{sn}}^0; \quad D\{z\} = \frac{\sigma_{\text{sn}}^0{}^2}{N}; \quad \text{СКО}\{z\} = \frac{\sigma_{\text{sn}}^0}{\sqrt{N}}. \quad (3.55)$$

Законы распределения плотности вероятности и интегральные законы распределения при последетекторном накоплении приведены на рис. 3.19.



**Рис. 3.19.** Плотности вероятности  $p(z)$  и интегральные функции распределения  $F(z)$  процесса на выходе квадратичного детектора при  $u_{\text{sq}}^2 = 1$  и числе независимых наблюдений в элементе разрешения, равном  $N$

Частным случаем при  $N=1$  является экспоненциальное распределение (3.51). Число независимых наблюдений определяется интервалом корреляции флуктуаций и периодом выборок. Для РБО пространственный интервал корреляции флуктуаций по азимуту при наблюдении фона местности соответствует ширине лепестка ДОР (3.48) и имеет значение, равное горизонтальному размеру антенны РБО  $D_{xant}$

$$X_{\text{corr}} \approx R\alpha_X = R\lambda/X_{\text{ant}} = D_{xant} \cdot \quad (3.56)$$

Интервал временной корреляции флуктуаций при наблюдении фона местности в РБО равен времени, за которое радиолокатор перемещается на азимутальный размер антенны:

$$\tau_{\text{corr}} \approx D_{xant}/V, \quad (3.57)$$

где  $V$  – путевая скорость.

Поскольку интервал корреляции азимутального сигнала в РБО значительно меньше длительности сигнала, принимаемого от данного элемента ( $T_{\text{sig}}=X_{\text{ant}}/V$ ), возможно усреднение флуктуаций сигнала за время наблюдения, причем максимальное число независимых наблюдений в элементе разрешения составляет

$$N_X \leq N_{X \text{ max}} = X_{\text{ant}}/D_{xant} = R\lambda/D_{xant}^2. \quad (3.58)$$

При наблюдении групповых целей, размеры которых меньше, чем азимутальное разрешение РБО, число независимых наблюдений вычисляются по формуле

$$N_X = \begin{cases} X_{\text{ant}}/VT_p & X_a \leq X_{\text{ant}} \\ X_{\text{ant}}/X_a & X_a > X_{\text{ant}} \end{cases}, \quad (3.59)$$

где  $T_p$  – период зондирования;  $VT_p$  – путь, проходимый радиолокатором за период зондирования.

В РБО в отличие от РСА нет ограничений на выбор периода повторения зондирующего сигнала. Его выбирают из требуемой полосы съемки, и может оказаться, что его величина превышает интервал корреляции флуктуаций принимаемого сигнала. Тогда число отсчетов сигнала  $N_X$  будет меньше  $N_{X \text{ max}}$ , но все они будут некоррелированными.

*Радиометрическое разрешение* характеризует возможность различения объектов, имеющих яркостные контрасты, т.е. отличающиеся по значениям ЭПР или УЭПР. Для оценки радиометрического разрешения предлагались различные критерии [295, 319, 413], основанные на оценке вероятности ошибки правильного обнаружения яркостного контраста. Сравнение этих критериев показало, что наиболее устойчивым параметром является оценка среднеквадратичного отклонения флуктуаций наблюдаемого процесса.

Техническим параметром, характеризующим радиометрическое разрешение РБО или РСА, является значение среднеквадратичного отклонения (СКО) флуктуаций наблюдаемого процесса при большом отношении сигнал/шум, когда  $\sigma_{\text{sr}}^0 \approx \sigma^0$ .

*Разрешаемое приращение УЭПР* (дифференциальный контраст) и *разрешаемый абсолютный контраст* (в децибелах) определяются формулами

$$\delta K_{\text{sn}} = \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (3.60)$$

$$K_{\text{sn,дБ}} = 10 \log \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{N}} \right), \quad (3.61)$$

где  $N$  – число независимых наблюдений (в общем случае – по площади наблюдаемого объекта, см. подраздел 3.5.2).

На практике важны случаи, когда требуется оценка радиометрического разрешения участков местности с малой УЭПР, близкой к чувствительности РБО или РСА  $\sigma_{\text{не}}^0$  (используют термин *радиометрическая чувствительность*). При наблюдении участков местности, окруженных неотражающей поверхностью, например, при обнаружении контраста вода/суша, разрешаемая УЭПР

$$\sigma_{\text{min}}^0 = \frac{\sigma_{\text{не}}^0}{\sqrt{N}}. \quad (3.62)$$

При оценке разрешаемого контраста между двумя участками с разными УЭПР  $\sigma^0$  и  $\sigma_1^0$  формулы (3.60)–(3.62) принимают вид

$$\delta K = \frac{\sigma_1^0 - \sigma^0}{\sigma^0} = \frac{1 + \sigma_{\text{не}}^0 / \sigma^0}{\sqrt{N}}; \quad (3.63)$$

$$\sigma_1^0 = \sigma^0 (1 + \delta K) = \sigma^0 \left( 1 + \frac{1 + \sigma_{\text{не}}^0 / \sigma^0}{\sqrt{N}} \right). \quad (3.64)$$

Разрешаемый контраст между участками фона, измеряемый в децибелах

$$K_{\text{дБ}} = 10 \log \left( 1 + \frac{1 + \sigma_{\text{не}}^0 / \sigma^0}{\sqrt{N}} \right). \quad (3.65)$$

Заметим, что приведенные оценки радиометрического разрешения по значению СКО флуктуаций (3.63) характеризуют также случайную погрешность измерения УЭПР по результатам радиолокационной съемки ( $\text{СКО} \{ \sigma_1^0 \} = \sigma_1^0$ ). Вероятность ошибки обнаружения контраста между участками, определяемого выражением (3.64), составляет около 0,35. Повышение точности измерений и повышение вероятности различения контрастов между участками достигается увеличением числа наблюдений, в том числе путем усреднения отсчетов по площади наблюдаемого участка (межэлементное некогерентное накопление – см. подраздел 3.5.2).

### **3.5.2. Радиометрическое разрешение в РСА**

В РСА получение высокого пространственного разрешения связано с когерентной обработкой траекторного сигнала в пределах зоны облучения ДНА по азимуту. В результате в каждом элементе разрешения РЛИ формируется однократное наблю-

дение  $N=1$ . Возможен обмен пространственного разрешения на радиометрическое разрешение. Для этого увеличивают размеры элемента разрешения РЛИ по азимуту и/или по дальности с увеличением его площади в  $N_e$  раз и применяют внутриэлементное некогерентное накопление ( $N_e$  наблюдений в элементе разрешения). Это достигается путем уменьшения длины синтезированной апертуры в  $N_x$  раз, по сравнению с предельной, а также разделением спектра зондирующего сигнала на  $N_R$  субспектров по дальности

$$N_e = N_x N_R . \quad (3.66)$$

Применение такой обработки при синтезе РЛИ облегчает требования к вычислительным средствам синтеза и поэтому часто использовалось в РСА предыдущих поколений. В современных РСА при наличии высокопроизводительной вычислительной техники более эффективно получение РЛИ с предельным разрешением по азимуту и дальности и применение межэлементного некогерентного накопления по площади наблюдаемого объекта. Полное число наблюдений

$$N = N_e N_s , \quad (3.67)$$

где  $N_s = S_{\text{geom}} / \rho_x \rho_y$  – число элементов разрешения по площади объекта.

Межэлементное некогерентное накопление (усреднение отсчетов РЛИ по площади наблюдаемых объектов) широко используют при тематической обработке РЛИ (см. гл. 7 и 9). Выделяя участки с однородной статистикой (поля, лесные массивы), в том числе методами автоматической сегментации РЛИ, определяют их конфигурацию и усредняют параметры сигнала по всей площади выделенного сегмента. Такая процедура позволяет резко повысить радиометрическое разрешение и точность измерения УЭПР протяженных объектов для их идентификации и измерения радиофизических характеристик при тематическом дешифрировании.

Технические параметры РСА или РБО: чувствительность  $\sigma_{\text{не}}^0$ , пространственное разрешение вдоль  $\rho_x$  и поперек  $\rho_y$  трассы КА и радиометрическое разрешение  $\delta K$  (или число наблюдений  $N_e$ ) в элементе разрешения на местности — однозначно определяют ошибки измерения контраста и точности оценки УЭПР объекта с данной площадью.

### **3.6. Факторы, определяющие выбор параметров РСА.**

#### **Функция неопределенности сигналов**

##### **3.6.1. Вид функции неопределенности сигналов в космических РСА**

В отличие от РСА авиационного базирования в космических РСА проблема обеспечения однозначности измерения времени задержки и доплеровской частоты принимаемых сигналов является крайне сложной. Она обусловлена *высокой скоростью движения радиолокатора относительно цели и большими наклонными дальностями наблюдения*. При расчете параметров РСА необходимо выбирать высокую частоту повторения (а значит, малый период повторения) зондирующих сигналов для передачи спектра доплеровских частот, определяемого горизонтальным размером антенны (для однозначности сигналов по азимуту) с учетом требований по полосе съемки

поперек трассы КА, которая ограничивается выбранным периодом зондирования (однозначность сигналов по дальности) [253, 310, 312, 313, 337, 401, 442, 469].

Функция неопределенности (ФН) зондирующего сигнала, предложенная в 50-х годах П. Вудвордом [54], описывает комплексную огибающую сигнала на выходе радиолокационного приемника как функцию дальности и радиальной скорости и определяет разрешающую способность, меру неопределенности, теоретическую точность измерения дальности и скорости целей. Основное определение ФН (иногда ее называют «телом неопределенности») — это автокорреляционная функция зондирующего сигнала при смещении его по времени или частоте, показывающая потенциальные возможности сигнала по измерению времени задержки или смещения по доплеровской частоте

$$\chi(\Delta t, \Phi) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{u}(t) \dot{u}^*(t + \Delta t) e^{-j2\pi\Phi t} dt, \quad (3.68)$$

где  $\Delta t$  — задержка по времени;  $\Phi$  — смещение по частоте;  $\dot{u}$  — комплексные значения принятого сигнала; \* — комплексно сопряженная величина.

Применяемые в радиолокации зондирующие сигналы различаются амплитудной и частотной зависимостями от времени. Их можно характеризовать корреляционными функциями (при смещении по времени), зависимостью при смещении по частоте, функцией неопределенности (при смещениях по времени и частоте), длительностью (проекция сечения ФН на временную ось), полосой частот (проекция сечения ФН на частотную ось). Наиболее широко используемый вид зондирующих сигналов в космических РСА — *пачки ЛЧМ-импульсов*, которые имеют ряд преимуществ, например, перед фазоманипулированными сигналами:

- одинаковая структура по координатам азимута и дальности;
- сохранение формы при сдвиге по доплеровской частоте;
- сохранение формы при преобразовании из временной области в частотную и обратно;
- возможность применения эффективного алгоритма ЛЧМ-масштабирования для коррекции миграции дальности и интерполяции комплексных сигналов.

След функции неопределенности для одиночного ЛЧМ-импульса на плоскости

время–частота показан на рис. 3.20. Проекция следа ФМ на ось  $t$  равна длительности импульса  $\tau$ , на ось  $F$  — ширине спектра  $\Delta F$ . Вычисление автокорреляционной функции включает в себя умножение зондирующего сигнала на сопряженный ЛЧМ-множитель, который можно рассматривать как опорную функцию в согласованном фильтре обработки сигнала. В результате умножения частотная модуляция в импульсе оказывается скомпенсированной (deramped signal). После-

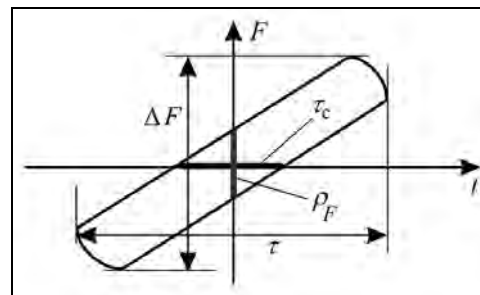


Рис. 3.20. След функции неопределенности на плоскости время – частота для одиночного ЛЧМ-импульса

дующее когерентное суммирование – вычисление интеграла в (3.68) приводит для  $\Delta t = 0$  к возрастанию амплитуды выходного импульса до максимального значения, пропорционального длительности импульса. При смещении по времени  $\Delta t \neq 0$  импульс оказывается заполненным разностной частотой и амплитуда суммированного сигнала падает. В результате формируется показанный на рис. 3.20 узкий сжатый отклик  $\tau_c$ , равный сечению ФН вдоль оси  $t$ . База сигнала – произведение полосы на длительность, определяет коэффициент сжатия  $k_c = \Delta F \tau$ . Разрешение по времени задержки равно длительности сжатого импульса  $\tau_c = \tau / k_c = 1 / \Delta F$ , разрешение по частоте равно  $\rho_F = 1 / \tau$  – сечению ФН по оси  $F$ .

При сохранении общей сущности имеется несколько вариантов ФН. Наиболее подходящим для РСА является определение ФН как *функции реакции согласованного фильтра* (импульсного отклика РСА – pulse response) на точечную цель. При этом под огибающей сигнала следует рассматривать форму зондирующего импульса и вызванные формой ДНА изменения амплитуды в пачке зондирующих импульсов. Таким образом, используемое в теоретических исследованиях ФН понятие нормированной амплитуды сигнала для импульсов прямоугольной формы с амплитудой  $U_{\max}$  можно представить в обобщенном виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 dt = \sum_{k=-\infty, n=-\infty}^{k=\infty, n=\infty} U_{\max}^2 \tau \frac{G_{\text{yant}}(\Delta\gamma_k)^2 G_{\text{xant}}(\alpha_n)^2}{(R + kR_p)^4} = 1, \quad (3.69)$$

где  $G_{\text{yant}}(\Delta\gamma_k)$  и  $G_{\text{xant}}(\alpha_n)$  – угломестная и азимутальная ДНА по мощности;  $\Delta\gamma_k$

– угол визирования от направления максимума ДНА;  $\alpha_n = \frac{\arcsin((nF_p \lambda) / (2V_{\text{sg}}))}{M_{\text{le}}}$  –

угловое положение  $n$ -го бокового лепестка по азимуту (доплеровской частоты);

$M_{\text{le}} = \frac{R_s}{R_e \cos \alpha_y}$  – коэффициент учета криволинейности движения КА, близкий к

единице для низкоорбитальных РСА (см. подраздел 5.4).

К основным свойствам ФН относятся ее максимальное значение и объем. Максимальное значение ФН имеет в начале координат

$$\max |\chi(\Delta t, \Phi)| = |\chi(0, 0)| = 2E. \quad (3.70)$$

Если сигнал нормирован согласно (3.69), то максимальное значение равно единице.

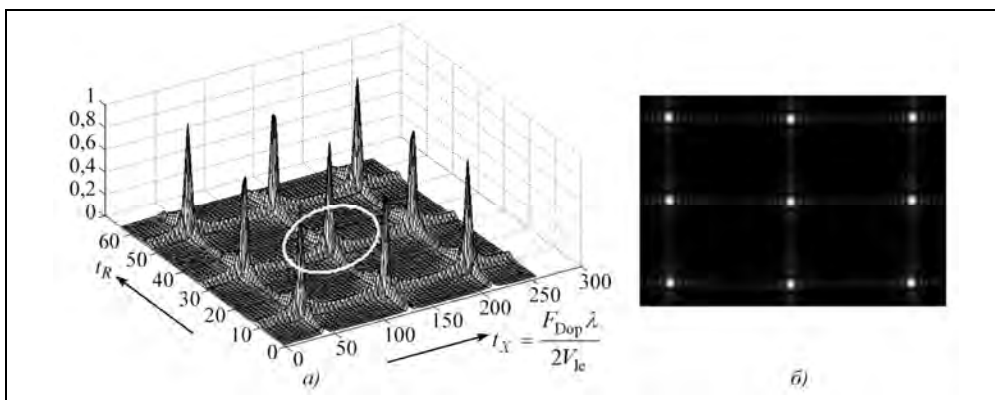
Объем ФН, заключенный между поверхностью  $|\chi(\Delta t, \Phi)|^2$  и плоскостью  $Ft$ , инвариантен к законам изменения амплитуды и фазы. Это свойство не позволяет изменить объем тела неопределенности путем изменения закона модуляции

$$\int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\chi(t, \Phi)|^2 dt d\Phi = |\chi(0, 0)|^2 = (2E)^2. \quad (3.71)$$

Из этого следует, например, что попытки уменьшить уровень боковых лепестков или ложных лепестков неоднозначности (см. ниже) приведут к расширению главного лепестка или увеличению числа боковых лепестков при сохранении полной энергии согласно (3.71).

Импульсный отклик РСА определяет реакцию системы (фильтра обработки) на точечную цель. ФН является предельным частным случаем импульсного отклика, когда амплитудная характеристика фильтра обработки совпадает с амплитудным распределением сигнала, фазовая характеристика комплексно сопряжена с сигналом.

Для пачки ЛЧМ-импульсов с периодом повторения  $T_p$ , длительность которой превышает несколько периодов повторения зондирующего сигнала, форма импульсного отклика (являющегося функцией неопределенности) имеет вид (рис. 3.21) двумерной «игольчатой» структуры в координатах «время задержки»  $t_R$  (определяет наклонную дальность) и «траекторное время»  $t_x$  – вдоль трассы полета (азимута), которое для РСА эквивалентно смещению по доплеровской частоте. Интервал между лепестками ФН по задержке равен периоду повторения зондирующего сигнала  $T_p$ , а по азимуту – времени, для которого изменение доплеровской частоты сигнала равно частоте повторения зондирующего сигнала  $F_p=1/T_p$ .



**Рис. 3.21.** Форма импульсного отклика РСА для пачки ЛЧМ-импульсов:  
 а – отображение в виде рельефа; б – яркостное РЛИ (значения по осям координат – условные;  
 область однозначности сигналов показана светлым овалом)

Явления, связанные с неоднозначностью сигналов по азимуту и дальности рассматриваются в подразделах 3.6.2 и 3.6.3.

Для подавления ложных боковых лепестков луч ДНА должен быть сужен до размеров светлого овала на рис. 3.21, что обеспечит пространственную фильтрацию помех неоднозначности.

### 3.6.2. Неоднозначность сигналов РСА по азимуту

Доплеровская частота отраженного сигнала зависит от путевой скорости и угла наблюдения



$$F_{\text{Доп}} = \frac{2V_{\text{sg}}}{\lambda} \sin \alpha \approx \frac{2V_{\text{sg}}}{\lambda} \alpha, \quad (3.72)$$

где  $V_{\text{sg}}$  – путевая скорость;  $\alpha$  – угол от нормали к вектору путевой скорости.

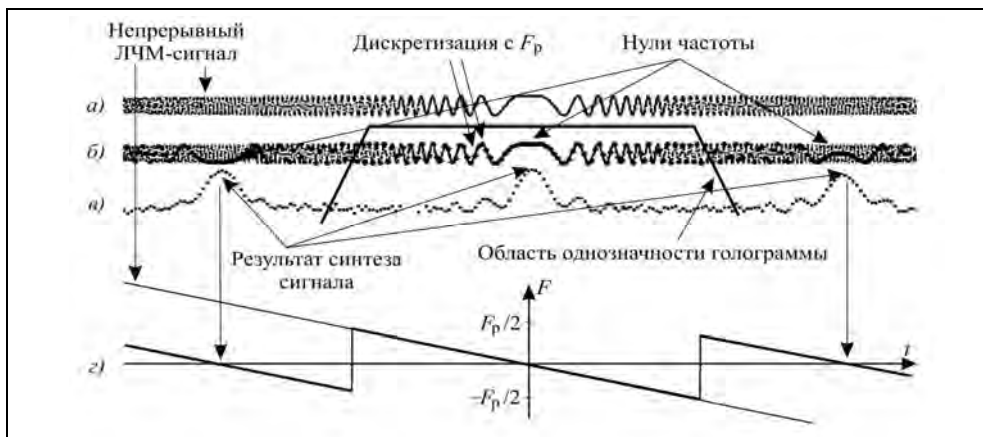
Согласно теореме Котельникова для передачи доплеровских частот сигнала нужно, чтобы частота повторения превышала удвоенную максимальную частоту

$$F_p \geq 2F_{\text{max}} = k_x \Delta F_{\text{Доп}} = k_x \frac{2V_{\text{sg}}}{D_{\text{хant}}}, \quad (3.73)$$

где  $\Delta F_{\text{Доп}} \approx 2V/D_{\text{хant}}$  – полоса доплеровских частот;  $k_x=1,3\dots1,5$  – коэффициент запаса, обеспечивающий подавление помех неоднозначности до уровня минус 20...25 дБ.

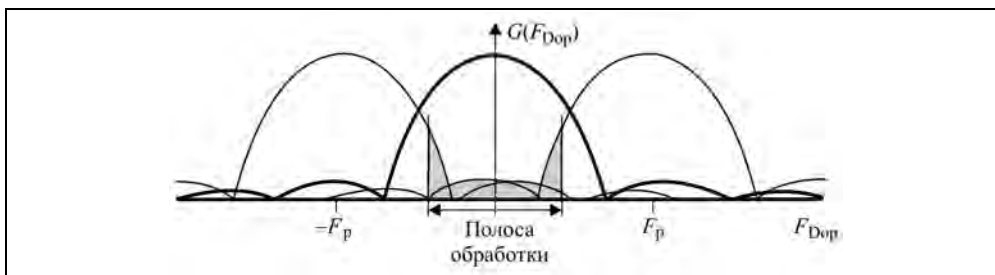
Появление неоднозначности по азимуту иллюстрирует рис. 3.22.

В непрерывном ЛЧМ-колебании после его квантования по времени с частотой повторения  $F_p$  частоты, которые выше  $F_p/2$ , не воспроизводятся, поскольку возникает строб-эффект. Появляется неоднозначность сигнала, которая приводит к тому, что энергия из побочных спектров с центральными частотами, кратными  $F_p$ , «сворачивается» в область главного лепестка, имеющего нулевую центральную частоту (рис. 3.23).



**Рис. 3.22.** Возникновение неоднозначности по азимуту:

*a* – непрерывное ЛЧМ-колебание; *b* – квантование процесса по времени (дискретные отсчеты); *в* – результат синтеза сигнала с неоднозначностью; *г* – временные зависимости доплеровской частоты и сигнала после дискретизации



**Рис. 3.23.** «Сворачивание» энергии побочных максимумов в область главного лепестка

Как правило, помехи неоднозначности не видны на уровне отражения от земной поверхности. Однако на участках границы вода/суша они могут создавать ложные образы, затрудняющие дешифрирование снимков. Так, на рис. 3.24 приведено РЛИ Ладожского озера (РСА «Меч-К» КА «Космос-1870»), на котором видны артефакты, вызванные неоднозначностью по азимуту. Яркость изображения водной поверхности, кроме прибрежной зоны, повышена благодаря работе быстродействующего АРУ по дальности. На водной поверхности видны возмущения, вызванные, дождем, вихрями, а также артефактами отражения от суши, смещенными по азимуту.



Рис. 3.24. Образование артефактов на РЛИ, вызванных неоднозначностью сигналов по азимуту

Интегральный уровень паразитных сигналов (отношение мощности сигналов неоднозначности к мощности сигнала в максимуме синтезированной ДНА) зависит от полосы доплеровских частот, используемой для синтеза РЛИ, отношения частоты повторения к полосе доплеровских частот, а также от уровня боковых лепестков антенны РСА по азимуту. Он равен

$$a_X = \frac{\sum_n \left( \int_{F_{\text{Dop1}} + nF_p}^{F_{\text{Dop2}} + nF_p} G_F^2(F_{\text{Dop}}) \right)}{\left( \int_{F_{\text{Dop1}}}^{F_{\text{Dop2}}} G_F(F_{\text{Dop}}) \right)^2}, \quad (3.74)$$

где  $n$  – номера зон неоднозначности (обычно не более  $n = \pm 1$ );  $F_{\text{Dop1}}$ ,  $F_{\text{Dop2}}$  – пределы интегрирования при синтезе РЛИ;  $G_F(F_{\text{Dop}}) = G_X(\alpha)$  – пересчет азимутальной формы ДНА по полю из угловой координаты к доплеровской частоте с учетом соотношения  $F_{\text{Dop}} = \frac{2dR}{\lambda dt} \approx \frac{4V}{\lambda} \alpha$ .

### 3.6.3. Неоднозначность сигналов РСА по дальности

Периодическая структура излучаемого сигнала (3.1) приводит к неоднозначности по дальности, вызванная тем, что в строб приема могут приходить сигналы, отраженные целями не только от «своего» зондирующего импульса, но и от предыдущих периодов зондирования и также от более поздних периодов зондирования. Сложность проблемы для космических РСА вызвана тем, что для передачи широкого спектра доплеровских частот приходится выбирать период повторения много меньше времени запаздывания сигнала. Интервал неоднозначности по времени пересчитывается в «рекуррентную дальность», равную половине расстояния распространения радиоволн за длительность периода повторения

$$R_p = cT_p / 2. \quad (3.75)$$

Первое условие – неоднозначность по дальности – исключается путем пространственной селекции сигналов, т.е. применением узкой диаграммы антенны в вертикальной плоскости, ослабляющей отраженные сигналы от соседних зон, удаленных на рекуррентную дальность. Требуемая ширина луча по углу места должна удовлетворять двум условиям – обеспечению полосы захвата и отстройки от сигналов неоднозначности. Геометрические соотношения, связывающие зону захвата, рекуррентную дальность и ширину ДНА, определяются из треугольников  $SAB$  и  $ABC$  на рис. 3.25.

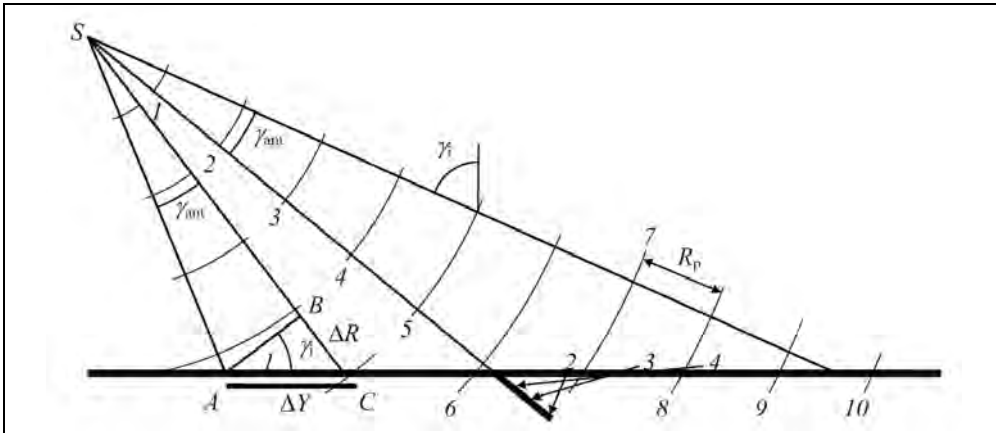


Рис. 3.25. Проявление неоднозначности сигналов по дальности (для упрощения Земля показана плоской)

Для обеспечения требуемой полосы захвата  $AC$  (отмечена жирной линией на рис. 3.25) необходимо, чтобы ширина угломестной ДНА  $\gamma_{ant}$  была не менее величины

$$\gamma_{ant} \geq \frac{AB}{R} = \frac{\Delta Y \cos \gamma_i}{R} = \frac{\Delta R \operatorname{ctg} \gamma_i}{R}, \quad (3.76)$$

где  $\Delta Y$  и  $\Delta R$  – полосы съемки на местности и по наклонной дальности;  $R$  – наклонная дальность центра полосы съемки;  $\gamma_i$  – угол падения.

Второе условие – подавление сигналов от соседних зон неоднозначности – требует выбора ширины угломестной ДНА таким образом, чтобы ее след АС (полоса съемки на местности) на поверхности Земли был меньше расстояния по Земле между точками пересечения соседних окружностей 4 и 5 с радиусами, кратными рекуррентной дальности. В противном случае (правая область рисунка, окружности 6–10) в строб приема будут попадать сигналы с нескольких интервалов рекуррентной дальности. Таким образом, ширина угломестной ДНА ограничена максимальным значением

$$\gamma_{\text{ant}} \leq \frac{R_p \operatorname{ctg} \gamma_i}{R k_r}, \quad (3.77)$$

где  $k_r = 1, 2, \dots, 1, 4$  – коэффициент запаса, определяемый допустимым уровнем сигналов неоднозначности по дальности, который рассчитывается по формуле дальности с учетом формы ДНА и изменения наклонной дальности.

Отношение мощностей ложных сигналов к мощности полезного сигнала для равномерного фона (для двух соседних зон неоднозначности) определяется соотношением

$$a_R = \frac{R^4}{G_{\text{yant}}^4(\gamma(R))} \left\{ \frac{G_{\text{yant}}^2(\gamma(R+R_p) - \gamma_0)}{(R+R_p)^4} + \frac{G_{\text{yant}}^2(\gamma(R-R_p) - \gamma_0)}{(R-R_p)^4} \right\}, \quad (3.78)$$

где  $R$  – наклонная дальность до цели;  $\gamma$  – угол визирования;  $G_{\text{yant}}(\gamma - \gamma_0)$  – КУ антенны в направлении угла визирования  $\gamma$  в угломестной плоскости;  $\gamma_0$  – угломестное положение максимума ДНА;  $R_p$  – рекуррентная дальность;  $R+R_p$  и  $R-R_p$  – расстояния до целей, формирующих сигналы неоднозначности. Значения  $\chi(R)$ ,  $\chi(R+R_p)$  и  $\chi(R-R_p)$  по формулам (3.4)–(3.6).

Вертикальный размер антенны находят по выбранной из условий (3.76) и (3.77) ширины ДНА по углу места.

Вертикальный размер антенны находят по выбранному из обоих условий углу ДНА

$$D_{\text{yant}} = \lambda / \gamma_{\text{ant}}. \quad (3.79)$$

При этом полоса съемки

$$\Delta Y = \frac{c}{V} \frac{D_{\text{yant}}}{4k_r k_x \sin \gamma_i}. \quad (3.80)$$

Влияние помех неоднозначности проявляется в виде ложных изображений, накладывающихся на изображение наблюдаемого участка местности. Значения коэффициентов запаса  $k_r$ ,  $k_x$  выбирают с учетом отношения сигнал/шум на выходе РСА. Примерные нормы на допустимый интегральный уровень ложных сигналов – минус 20...25 дБ. Экспериментально установлено, что эта норма обеспечивает высокое качество изображения для большинства сюжетов радиолокационной съемки. Однако в нетипичных ситуациях (например, геологическая разведка шельфа), когда область неоднозначности приходится на область с высоким отражением (горы),

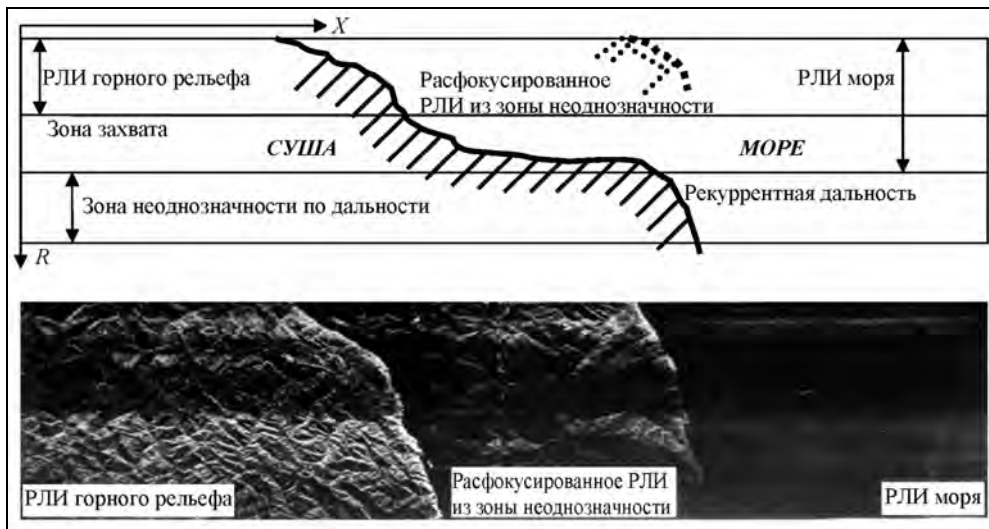
а основной лепесток ДНА – на область с низким отражением (море), возможны показанные на рис. 3.26 помехи неоднозначности по дальности, существенно снижающие достоверность получаемой радиолокационной информации.

Отдельного внимания требует оценка помех от альтиметровых сигналов, принимаемых по боковым лепесткам ДНА от участка местности под РЛС. Дело в том, что при вертикальных углах отражение имеет характер, близкий к зеркальному, а, кроме того, отраженный сигнал формируется большой площадкой в виде круга с радиусом, определяемым разрешением по наклонной дальности:

$$r_{\text{altim}} = \sqrt{(H + \rho_R)^2 - H^2} \approx \sqrt{2H\rho_R}, \quad (3.81)$$

где  $H$  – высота орбиты КА;  $\rho_R$  – разрешение по наклонной дальности для данного сечения тракта РСА, по которому оценивается влияние помех от альтиметрового сигнала – в приемном тракте (длительность излученного импульса) или на выходе РСА (определяется длительностью сжатого импульса). Соответственно ЭПР площадки фона точно под РЛС

$$\sigma_{\text{altim}} = 2\pi r_{\text{altim}} \sigma^0(0) = 2\pi H \rho_R \sigma^0(0). \quad (3.82)$$



**Рис. 3.26.** Образование ложного расфокусированного изображения горного рельефа на фоне морской поверхности (Черное море, побережье Турции, РСА «Меч-К» КА «Космос-1870»)

Используя формулы (3.81) и (3.82), получаем выражение для относительного уровня мощности альтиметрового сигнала по отношению к сигналам в главном лепестке ДНА

$$a_{\text{altim}} = \frac{2\pi\sigma^0(0)R^4}{G_{\text{yant}}^2(\gamma(R) - \gamma_0)\sigma^0(\gamma_i)H^3\rho_x}, \quad (3.83)$$

где  $\sigma^0(\gamma_i)$  – УЭПР фона в точке наблюдения с углом падения  $\gamma_i$ .

Обычно выбор параметров РСА для обеспечения однозначности сигналов представляет собой итерационную процедуру. После выбора горизонтального размера антенны из условия однозначности по азимуту (доплеровской частоте) рассчитывают вертикальный размер антенны по формуле (3.79) для середины полосы обзора (в пределах углов падения  $30...50^\circ$ ). Затем проверяют отсутствие неоднозначности на заданной дальней границе полосы обзора и выполнение требований по полосе захвата на малых дальностях. Если различия оказываются большие, то задаются максимальным размером антенны, исходя из ширины луча на максимальной дальности, а в ближней зоне формируют широкий луч по углу места.

Следует иметь в виду, что сигналы от целей, облученные в разных периодах зондирования и суммирующиеся в строке приема, будут при синтезе РЛИ формировать отметки, расфокусированные по азимуту. Вид функции неопределенности зондирующего сигнала в РСА при смещении по азимуту и дальности показан на рис. 3.27, где: *a* – гипотетический случай, когда нет ослабления паразитных максимумов, *б* – реальная ситуация применения пространственной селекции соответствующим выбором ДНА по углу места и азимуту.

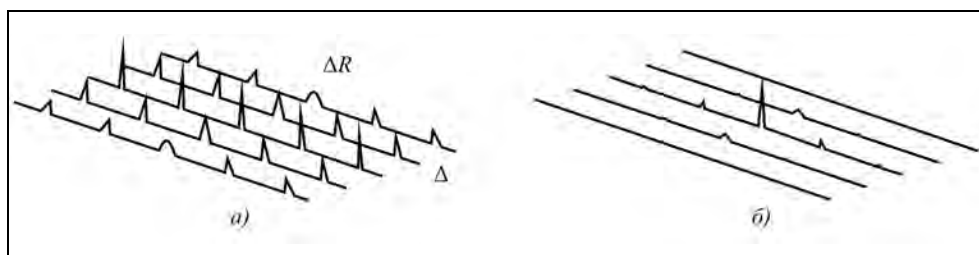


Рис. 3.27. Вид функции неопределенности РСА при смещении цели по дальности и азимуту: *a* – без пространственной селекции; *б* – с учетом пространственной селекции, создаваемой антенной РСА

Характерно, что паразитные максимумы при смещении по дальности имеют меньшую амплитуду, но растянуты по азимуту (расфокусировка). Общая энергия в каждом из паразитных лепестков на рис. 3.27 одинакова.

Возможны пути снижения помех неоднозначности (см. гл. 8).

### 3.7. Особенности работы систем радиолокационного наблюдения космического базирования при воздействии активных помех

Одной из важнейших характеристик систем радиолокационной разведки является эффективность их работы в условиях ведения радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Помехозащищенность РЛС в общем случае принято оценивать параметрами скрытности и помехоустойчивости работы [32, 33\*, 62, 105, 118, 187].

*Скрытность* характеризует степень защищенности излучаемых сигналов РЛС от обнаружения и измерения их параметров системой радиотехнической разведки (РТР) противника и создания специально организованных помех. *Помехоустойчивость* характеризует эффективность работы РЛС в условиях воздействия помех.

Заметим, что постанова помех радиолокаторам дистанционного зондирования Земли в мирное время запрещена Международными соглашениями и трактуется как вооруженный акт. Поэтому задача РЭБ должна рассматриваться в контексте информационного обеспечения военных операций в конкретных условиях вооруженного конфликта.

В отличие от самолетных РЛС, для которых траектория полета, время включения и параметры РЛС противнику неизвестны, ситуация для космических РСА землеобзора иная. Орбитальное движение КА с РСА заранее известно по данным траекторных измерений, а параметры аппаратуры — по данным средств РТР. Высокий уровень мощности зондирующего сигнала у поверхности Земли облегчает задачу РТР, в том числе при переходе на литерные частоты. Априорно предполагают, что каждый раз, когда КА с РСА появляется в секторе, пригодном для проведения съемки, она выполняется. Таким образом, параметр «*скрытность*» для космических РСА не применяется.

Для оценки помехоустойчивости РСА проведем расчет энергетического потенциала постановщика помех, обеспечивающего подавление космического РСА землеобзора. Результаты такого расчета применимы и для решения задачи защиты от разведки противника. Будем считать, что *сторона, создающая помехи, располагает следующей информацией* о РСА:

- рабочий диапазон волн РСА  $\lambda$ ;
- ширина полосы зондирующего сигнала  $\Delta F$  в ожидаемом режиме наблюдения;
- геометрические размеры антенны РСА по горизонтали  $D_{xant}$  и вертикали  $D_{yant}$  и ее площадь  $S_{ant} = D_{xant} \times D_{yant}$ ;
- импульсная мощность излучения  $P_{imp}$ ;
- длительность зондирующего импульса  $\tau$ ;
- наклонная дальность до РСА  $R$ .

Рассмотрим задачу подавления РСА с высокой разрешающей способностью, предназначенного для обнаружения и распознавания малоразмерных наземных целей, имеющих малый контраст по отношению к окружающему фону (до 10 дБ). Эта ситуация имеет место, в частности, при скрытии передислокации техники из одного места расположения в другое при подготовке военных операций.

Практика использования современных космических РСА предусматривает полное использование ресурсов КА по энергоснабжению и объему передаваемой на Землю информации для проведения регулярной съемки земной поверхности. Благоприятные условия для повторной съемки определяются циклом повторения орбит (обычно от 10 до 25 сут с возможным специальным выбором параметров орбиты КА для уменьшения цикла до трех суток [436]). Съемка ведется с получением комплексных РЛИ, пригодных для фазовой (интерферометрической) обработки с исключением отметок от стационарных объектов.

Проведенное моделирование зашумленных КРЛИ с разрешением 1...2 м показало, что для уверенного подавления РСА в этой ситуации достаточно, чтобы спектральная плотность помехи превышала спектральную плотность процесса от

### Глава 3. Современные методы космического радиолокационного землеобзора ...

фона местности более, чем на 25 дБ, т.е., чтобы результирующее отношение сигнал/помеха было меньше минус 15 дБ. Тогда на РЛИ могут обнаруживаться только отметки от мощных отражателей – зданий, мостов, но в целом РЛИ будет непригодным для дешифрирования.

Приведенная цифра отношения сигнал/помеха может быть уточнена из следующих соображений. Если провести сглаживание РЛИ с потерей пространственного разрешения, то для площадных групповых объектов (стоянка техники) отношение сигнал/помеха может возрасти, и не исключено обнаружение факта исчезновения большого скопления объектов в одном месте и появление их в другом месте (без распознавания типа объектов).

Эффективное подавление РСА обеспечивается созданием в полосе зондирующего сигнала непрерывной шумовой помехи с потоком мощности вдоль траектории РСА, который позволяет снизить вероятность обнаружения целей на фоне подстилающей поверхности. Не входя в детали радиоэлектронной борьбы (РЭБ), рассмотренные в [33\*, 62, 118], дадим грубую оценку требований к постановщику помех для подавления РСА космического базирования.

Возможны следующие ситуации при создании активных помех для РСА:

- 1) постановка помех по главному лепестку ДНА радиолокатора, направленной на объект разведки;
- 2) постановка помех по боковым лепесткам ДНА.

В первом случае с менее жесткими требованиями по энерговооруженности возможно применить более простую аппаратуру постановщика помех с антенной, имеющей круговую ДНА по азимуту и 30...70° по углам места, которые совпадают с рабочими углами места РСА. Второй случай требует применения узконаправленных антенн, следящих за спутником с РСА.

Мощность суммарного процесса от местности (несжатый сигнал) определится формулой дальности (см. раздел 3.4):

$$P_r = \frac{P_{\text{imp}} G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} S_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{imp}} S_{\text{eff}}^2 \sigma^0}{4\pi R^4 \lambda^2} \frac{R\lambda}{D_{\text{xant}}} \frac{c\tau}{2\sin\gamma_i}, \quad (3.84)$$

где сделана замена  $G = 4\pi S_{\text{eff}} / \lambda^2$  – КНД антенны РСА;  $\sigma^0$  – УЭПР фона местности (суша);  $\sigma$  – ЭПР облучаемого участка местности с геометрическими размерами

$$\sigma = \sigma^0 \Delta X \Delta Y = \sigma^0 \frac{R\lambda}{D_{\text{xant}}} \frac{c\tau}{2\sin\gamma_i}, \quad (3.85)$$

где  $\sigma^0$  – УЭПР подстилающей поверхности;  $\Delta X = R\lambda / D_{\text{xant}}$  – зона облучения антенны РСА вдоль линии пути;  $\Delta Y = c\tau / 2\sin\gamma_i$  – зона поперек линии пути, соответствующая длительности зондирующего импульса ( $\gamma_i$  – угол падения).

Преобразуя формулу дальности (3.84) для случая распространения сигнала в одну сторону – от передатчика помех до РСА, найдем мощность шумовой помехи на входе приемника РСА



**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

$$P_{\text{грп}} = \frac{P_{\text{тр}} G_{\text{тр}}}{4\pi R^2} S_{\text{eff}}, \quad (3.86)$$

где  $P_{\text{тр}}$  – мощность передатчика помех;  $G_{\text{тр}}$  – КНД антенны передатчика помех.

Задав отношение сигнал/шум+помеха и пренебрегая составляющей шума  $q_{\text{снр}} = P_{\text{г}} / (P_{\text{гн}} + P_{\text{грп}}) \approx P_{\text{г}} / P_{\text{грп}}$ , получим формулу для расчета мощности передатчика помех

$$P_{\text{тр}} \approx \frac{2P_{\text{имп}} D_{\text{yant}} \sigma^0}{q_{\text{снр}} R \lambda G_{\text{тр}}} \frac{c\tau}{2 \sin \gamma_i}, \quad (3.87)$$

где множитель 2 в первой дроби учитывает потери при использовании круговой поляризации излучаемой помехи для подавления поляриметрических РСА.

Оценим необходимую мощность источника помех применительно к гипотетическим РСА со следующими параметрами:

диапазоны волн  $X, C, S, L$ ;

размеры антенны РСА  $D_{\text{xant}} \times D_{\text{yant}} = 5 \times 2 \text{ м}^2$  для  $X$ - и  $C$ -диапазонов волн и  $D_{\text{xant}} \times D_{\text{yant}} = 10 \times 3 \text{ м}^2$  – для  $S$ - и  $L$ -диапазонов волн;

наклонная дальность  $R = 600 \text{ км}$ ;

импульсная мощность  $P_{\text{имп}} = 500 \text{ Вт}$  для  $X$ - и  $C$ -диапазонов волн и  $P_{\text{имп}} = 1000 \text{ Вт}$  для  $S$ - и  $L$ -диапазонов волн;

длительность зондирующего импульса  $\tau = 10 \text{ мкс}$ ;

угол падения  $\gamma_i = 40^\circ$ .

Примем, что УЭПР фона в указанных диапазонах обратно пропорциональна длине волны. Их расчетные значения приведены в табл. 3.1. Зададим отношение сигнал/помеха  $q_{\text{снр}} = 0,0032$  (–25 дБ).

Для постановщика помех по главному лучу предполагаем использование антенны с круговой ДНА по азимуту, а по углу места – в пределах 30...70. КНД такой антенны равен  $G_{\text{тр}} = 4,55$ . Расчеты по формуле (3.87) сведены в табл. 3.1.

**Таблица 3.2. Параметры постановщика помех**

Параметр	Диапазон волн РСА			
	$X$	$C$	$S$	$L$
Площадь антенны РСА, $\text{м}^2$	10	10	30	30
Импульсная мощность РСА, Вт	500	500	1000	1000
Расчетная УЭПР фона местности, дБ	–15	–17,7	–20	–23
Подавление РСА по главному лепестку ДНА				
Площадь антенны постановщика помех, $\text{м}^2$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$19,1 \cdot 10^{-3}$
Излучаемая мощность помехи, Вт	5360	1535	6540	1092
Подавление РСА по боковым лепесткам ДНА ( $\geq -25$ дБ)				
Площадь антенны постановщика помех, $\text{м}^2$	0,12	0,41	1,23	1,23
Диаметр антенны постановщика помех, м	0,46	0,86	1,5	1,5
Излучаемая мощность помехи, Вт	4671	1340	5352	5352

### Глава 3. Современные методы космического радиолокационного землеобзора ...

Требования по мощности могут быть снижены в разы при создании помех в меньшем секторе по азимуту, в котором ожидается появление РСА. Для подавления РСА по боковым лепесткам ДНА энергетический потенциал постановщика помех  $P_{\text{грп}} \cdot G_{\text{гр}}$  должен возрасти в сотни и тысячи раз. Это можно реализовать применением остронаправленной антенны, установленной на подвижной платформе для слежения за спутником с РСА. Ширина луча антенны не должна быть уже  $5^\circ$ , чтобы не возникало проблем, связанных с ошибками прогнозирования траектории спутника с РСА. КНД антенны для этого случая –  $G_{\text{гр}}=1650$ , т.е. в 363 раза больше, чем для подавления РСА по главному лепестку ДНА при ненаправленной ДНА постановщика помех. Параметры постановщика помех для подавления РСА по боковым лепесткам с уровнем минус 25 дБ приведены в табл. 3.2. Такая аппаратура реализуема в наземных (мобильных) или корабельных условиях, однако эффективность подавления может быть снижена принятием на борту специальных мер по повышению помехозащищенности, часть из которых рассмотрена ниже.

Применение в РСА многосекционных АФАР с многоканальными выходами позволяет динамически управлять формой ДНА, направляя нуль ДНА на источник помех. В принципе число подавляемых источников равно числу секций АФАР (приемных каналов) минус единица.

Более эффективно использовать в АФАР приемные модули с цифровым выходом, обеспечивающие гибкое управление положением луча ДНА. Это расширит возможности подавления помех путем формирования нулей ДНА по азимуту и углу места. При задаче наблюдения локальных участков с кадровой съемкой и ограниченным объемом выходных данных (кадровый прожекторный режим) адаптивная обработка сигналов для режекции помех может быть реализована на наземном пункте обработки информации при синтезе РЛИ.

Помехоустойчивость системы радиолокационного наблюдения космического базирования может быть существенно повышена путем многопозиционного зондирования с увеличением состава орбитальной группировки или применением пассивных приемников на авиационных носителях, включая БЛА. Ниже приведены формулы для расчета мощности передатчика помех при бистатическом радиолокационном зондировании.

Мощность сигнала от местности на входе приемного датчика равна

$$P_{\text{r2}} = \frac{P_{\text{имп}} G}{4\pi R^2} \frac{\sigma_2}{4\pi R_2^2} S_{\text{ant2}} = \frac{P_{\text{имп}} G S_{\text{ant2}} \sigma^0}{4\pi R^2 4\pi R_2^2} \frac{R_2 \lambda}{D_{\text{xant2}}} \frac{c\tau}{2 \sin \gamma_1}, \quad (3.88)$$

где  $R_2$  – наклонная дальность;  $S_{\text{ant2}}$  – эффективная площадь антенны приемного датчика;  $D_{\text{xant2}}$  – горизонтальный размер приемной антенны.

Принятая мощность помехи

$$P_{\text{грп2}} = \frac{P_{\text{гр}} G_{\text{гр}}}{4\pi R_2^2} S_{\text{ant2}}. \quad (3.89)$$

В отличие от рассмотренного выше моностатического случая задача подавления такой системы значительно усложняется из-за необходимости создания всена-

правленного поля помех высокого уровня, достаточного для подавления приемных РСА по боковым лепесткам. Возможность использования в многопозиционной системе авиационных датчиков, для которых неизвестны их количество и азимуты относительно постановщика помех является важным ресурсом повышения помехоустойчивости аэрокосмической информационной системы в целом [234].

Имеются предложения по снижению мощности постановщика помех путем использования имитационных помех, получаемых путем модуляции принятого прямого сигнала от РСА с последующим его переизлучением. Предполагается, что яркость ложных отметок на синтезированном РЛИ соизмерима с яркостью отметок от реальных объектов, что соответствует уменьшению (на 20...25 дБ) мощности постановщика помех по сравнению с шумовой помехой. Недостаток таких методов в отсутствии гарантированного скрывания объекта защиты. Не исключено, что применение алгоритмов интерферометрической обработки по серии снимков выявит эти искусственные образования и позволит режектировать их на снимках.

При защите ограниченных территорий возможно снижение средней мощности шумовой помехи в несколько раз путем синхронизации излучения помехи с моментом прихода зондирующего импульса РСА. Длительность шумового импульса уменьшают до величины

$$\tau_{\text{пн}} = 2Y_{\text{zone}} \sin \gamma_i / c + \tau, \quad (3.90)$$

где  $Y_{\text{zone}}$  – протяженность защищаемой зоны поперек линии пути спутника с РСА.

В целом **создание постановщиков помех для космических РСА** – сложная техническая задача, при решении которой необходимо **учитывать следующие факторы:**

- цель РЭБ и методы ее достижений для конкретных объектов и территорий;
- результаты анализа действующих и перспективных средств аэрокосмической радиолокационной разведки и их параметры, в том числе в возможных «экспериментальных» режимах, выходящих за рамки выделенной Регламентом радиосвязи полосы частот для радиолокации Земли из космоса;
- возможности реализации сложной антенной системы с гибким управлением ДНА по данным об орбитальной обстановке со средствами разведки;
- синхронизацию работы постановщика помех с зондирующими сигналами РСА, измеренными средствами РТР.

С учетом рассмотренных аспектов аппаратурной реализации в задаче РЭБ и тактике организации РЭБ в боевых условиях [33\*], можно сделать вывод, что аэрокосмическая система радиолокационного наблюдения при надлежащем ее построении может иметь достаточно высокую устойчивость к активным помехам.

---

## Глава 4

### РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОСМИЧЕСКИХ РСА

#### 4.1. Основные режимы радиолокационного обзора

Рассмотренные в гл. 3 явления, связанные с неоднозначностью сигналов в космических РСА, ограничивают возможности одновременной реализации высокой разрешающей способности по азимуту и широкой полосы съемки (зоны захвата) по дальности, а также ее перенацеливания в полосе обзора. Расширение полосы обзора позволяет уменьшить время повторной съемки заданных районов и повысить оперативность радиолокационного наблюдения. Эти вопросы, связанные с геометрией космического землеобзора и необходимым составом орбитальной группировки для получения требуемого периода обновления информации, обсуждаются в гл. 5.

Выбор, расчет и оптимизация параметров РСА являются итерационной процедурой, в которой следует учитывать располагаемые ресурсы КА по энергопотреблению, массе, тепловыделению, конструкции и компоновке аппаратуры на КА. Современная тенденция нахождения компромисса для удовлетворения требований, предъявляемых к информационной системе, предусматривает создание многоспутниковой орбитальной группировки с компактными РСА, располагающими широким набором режимов работы и параметров зондирующих сигналов, которые управляются цифровыми командами. Режимы работы РСА включают в себя комбинацию режимов обзора, поляриметрические режимы, индикацию движущихся целей, интерферометрическое зондирование. Предусматриваются также режимы многопозиционного зондирования.

Основные режимы обзора в космических РСА (рис. 4.1) включают в себя:

- 1) маршрутный режим обзора непрерывной съемки (МР);
- 2) широкозахватный режим Скансар (СС);
- 3) прожекторный кадровый режим (ПР).

Поляриметрическое и интерферометрическое зондирование в этих режимах обзора реализуют путем управления параметрами бортовых устройств РСА. Надлежащим образом выбирают время съемки набора РЛИ для совместной обработки, а при необходимости – управляют параметрами орбиты КА.

##### 4.1.1. Маршрутный режим обзора

*Маршрутный режим обзора*, показанный на рис. 4.1,*a*, – это режим непрерывной съемки в течение длительного времени, при котором полоса съемки фиксирована слева или справа относительно следа КА в пределах технически возможной полосы обзора. Из условий однозначности сигналов, рассмотренных в гл. 3, в маршрутном режиме разрешение по азимуту не может быть лучше половины горизонтального раскрытия антенны, а реализуемая полоса съемки (зона захвата) поперек линии пути

### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

не может превысить значения, равного рекуррентной дальности, деленной на синус угла падения. В маршрутном режиме современных РСА положение зоны захвата относительно следа КА можно задавать произвольно в пределах полосы обзора.

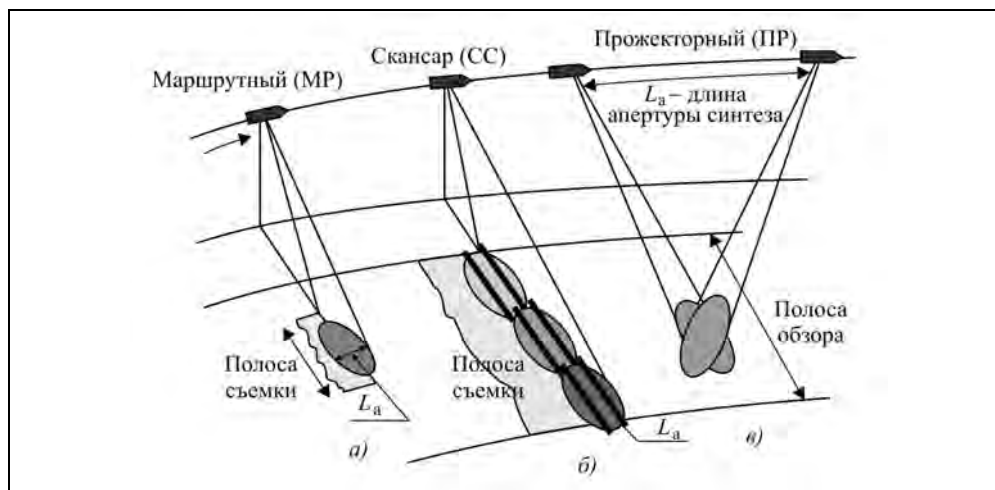


Рис. 4.1. Основные режимы обзора космических РСА:  
а – маршрутный; б – Скансар; в – прожекторный

Однако расширение полосы обзора в сторону максимальных дальностей требует увеличения вертикального размера антенны. Приближение ее к надиру сопровождается ухудшением разрешения поперек линии пути (по горизонтальной дальности). При проектировании РСА с широкой полосой обзора условие неоднозначности и потенциал проверяют на максимальной дальности, зону захвата – на минимальной дальности. Если при приближении к надиру не обеспечивается нужная зона захвата (из-за ограничения угломестной ДНА), то формируют луч необходимой ширины. При изменении положения зоны захвата в пределах полосы обзора необходимо изменять в небольших пределах частоту повторения таким образом, чтобы время распространения до центра заданной полосы съемки не было кратными периоду зондирования и не пришлось на момент излучения зондирующего импульса.

В маршрутном режиме обычно для формирования радиолокационного изображения полностью используют длину траекторного сигнала в пределах зоны облучения вдоль линии пути (обозначена  $L_a$  на рис. 4.1,а). Возможны варианты обработки сигналов – синтез РЛИ с длиной апертуры  $L_a$  и реализацией наилучшего разрешения по азимуту, равного половине горизонтального размера антенны  $\rho_x = D_{\text{хant}}/2$ , либо разделение апертуры  $L_a$  на субапертуры, синтез РЛИ с пониженным пространственным разрешением и применением некогерентного накопления (фильтрации спеклшума путем усреднения независимых наблюдений) для улучшения радиометрического разрешения в задачах мониторинга земных покровов (см. гл. 7 и 9).

Важное преимущество маршрутного режима состоит в том, что длина снимаемого маршрута может быть произвольной. Она определяется, в основном, тре-

буемыми районами съемки, с ограничениями по производительности линии передачи данных, а также по энергетике, поскольку РСА во время съемки потребляет повышенную мощность от буферных батарей.

#### 4.1.2. Широкозахватный режим Скансар

Если требуется широкая полоса съемки, в которой условия однозначности не удовлетворяются, то используют многолучевой режим работы. Полосу съемки реализуют несколькими парциальными лучами (режим Скансар, рис. 4.1,б). Это достигается ценой уменьшения времени синтеза апертуры и ухудшения разрешения в каждой из парциальных зон. Обзор ведут кадрами поочередно с переключением лучей.

Число лучей в угломестной плоскости (парциальных зон по дальности) определяется соотношением

$$N_z = k_r \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_p}, \quad (4.1)$$

где  $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$  – максимальная и минимальная границы зоны захвата по наклонной дальности;  $R_p = cT_p/2$  – рекуррентная дальность, соответствующая периоду повторения зондирующего сигнала;  $k_r$  – коэффициент запаса для устранения неоднозначности по дальности.

Принципиальные отличия режима Скансар от маршрутного режима состоят в следующем. В маршрутном режиме возможна съемка короткими кадрами, но при этом длина участка траектории съемки должна превышать размер снимаемого кадра плюс длина зоны облучения вдоль линии пути (см.  $L_a$  на рис. 4.1,а). Как отмечено в подразделе 4.1.1, длина синтеза РЛИ может быть уменьшена, а резерв использован для нескольких наблюдений. В режиме Скансар этот резерв используют для переключения парциальных зон, что позволяет расширить общую полосу съемки.

Разрешение вдоль линии пути (по азимуту) в режиме Скансар примерно равно

$$\rho_x \approx D_{xant} (N_z + 1)/2, \quad (4.2)$$

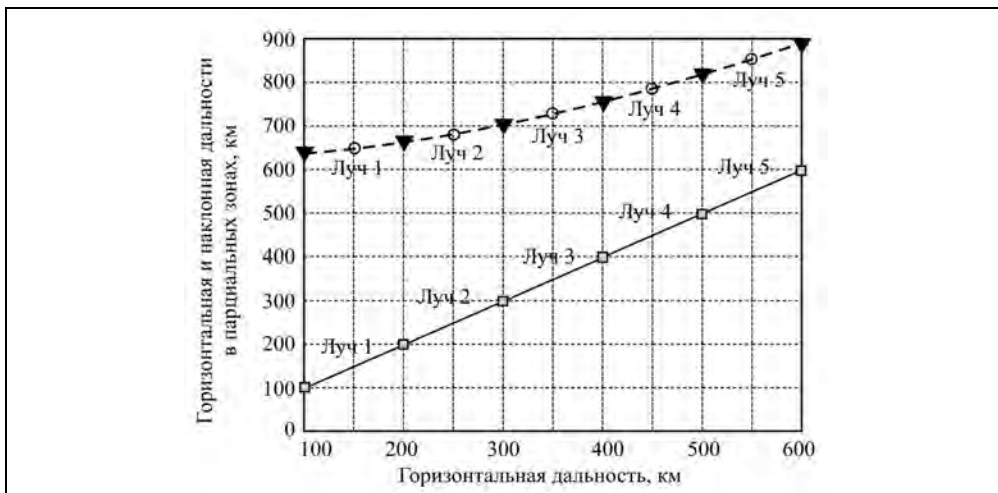
где  $D_{xant}$  – горизонтальный размер антенны РЛС.

Единица добавляется для того, чтобы не было ослабления сигнала в зоне, находящейся на краю диаграммы антенны. Сканирование лучей с частичным перекрытием соседних зон по углу места реализуется путем использования фазируемой антенной решетки либо переключением облучателей в зеркальной антенне.

Для получения одинаковой разрешающей способности по азимуту во всех парциальных зонах длина синтезированной апертуры и время синтеза должны быть пропорциональны наклонным дальностям до центра зон. На рис. 4.2 показаны рассчитанные по формулам, приведенным в гл. 3, графики для горизонтальной и наклонной дальностей и их распределение по парциальным лучам. Взяты параметры РСА: высота орбиты 630 км (солнечно-синхронная с углом наклона 98,2°), полоса съемки 500 км, углы падения от 10 до 48°, пять лучей. Для такой орбиты максимальная путевая скорость КА составляет  $V_{sg}=7657$  м/с (см. гл. 5). Ширина парциальных зон по горизонтальной дальности выбрана одинаковой, что обеспечивает примерно равную чувствительность РСА во всех лучах (с отклонением не

более  $\pm 1$  дБ). Значения наклонных дальностей для центра лучей (отмечены кружками) приближенно образуют геометрическую прогрессию с коэффициентом  $K_R=1,069$  при отношении наклонных дальностей на границах полосы съемки, равном 1,4. Полное время синтеза равно сумме парциальных времен плюс время синтеза в зоне, ближайшей к надиру

$$T_{\text{synt}} = T_{\text{synt}_N} + \sum_{k=1}^N T_{\text{synt}_k} = T_{\text{synt}_1} \left( 1 + \sum_{k=1}^N K_R^{k-1} \right) = T_{\text{synt}_1} \left( 1 + \frac{K_R^N - 1}{K_R - 1} \right). \quad (4.3)$$



**Рис. 4.2.** Распределение горизонтальной (сплошная линия) и наклонной (пунктир) дальностей по парциальным зонам в режиме Скансар

Уточненное значение разрешения по азимуту будет составлять

$$\rho_X = \frac{D_{\text{xant}}}{2} \left( 1 + \frac{K_R^N - 1}{K_R - 1} \right) = \frac{6,74 D_{\text{xant}}}{2}. \quad (4.4)$$

Выбранная геометрия расположения парциальных зон сканирования однозначно определяет ширину ДНА по углу места для каждого из лучей, а, следовательно, и вертикальный размер антенны для заданной длины волны РСА. С учетом требований по однозначности сигналов (подразделы 3.6.2, 3.6.3) выбирают частоту повторения зондирующих сигналов, по величине которой определяют требования к горизонтальному размеру антенны

$$D_{\text{xant}} \geq \frac{2k_x V_{\text{sg}}}{F_{\text{pmax}}}, \quad (4.5)$$

где  $F_{\text{pmax}}$  – наибольшее значение частоты повторения для парциальных зон.

Подставляя принятые параметры режима Скансар в (4.3)–(4.5) получаем при  $k_r = 1,3$  и  $k_x = 1,45$  требуемый размер антенны  $D_{\text{xant}} = 15$  м и разрешение по азимуту  $\rho_X = 50,5$  м. Время синтеза в каждой зоне вычисляют по известной формуле с учетом выбранной длины волны РСА

$$T_{\text{synt\_}k} = \frac{L_{ak}}{V_{sg}} = \frac{R_{0k} \lambda}{2V_{sg} \rho_X}, \quad (4.6)$$

где  $L_{ak}$  – длина синтезированной апертуры;  $R_{0k}$  – наклонная дальность в  $k$ -й парциальной зоне.

Кроме ухудшения азимутального разрешения отличие параметров режима Скансар от маршрутного режима состоит в более жестких требованиях по подавлению помех неоднозначности сигналов по азимуту. Как показано в гл. 3, рис. 3.23 и формула (3.74), влияние помех неоднозначности определяется отношением интегральной мощности сигнала в пределах полосы обработки к мощности паразитных составляющих, попадающих в полосу фильтра обработки. В маршрутном режиме за время прохождения азимутальной ДНА доплеровская частота принимаемого сигнала от каждой цели меняется в пределах полной полосы  $\Delta F_{\text{Dop}} = 2V_{sg} / D_{\text{xant}}$ , имея ноль доплеровской частоты в момент, когда цель находится в плоскости, нормальной к вектору путевой скорости РСА.

При синтезе апертуры, например, методом прямой свертки, принятый сигнал последовательно смещается по времени так, что его фазовая характеристика совпадает с комплексно сопряженной характеристикой опорной функции. Мощность сигнала от цели определяется его интегрированием по всему главному лепестку азимутальной ДНА, как это показано на рис. 4.3,а. В кадровом режиме Скансар с длительностью кадра, много меньшей времени прохождения сигналом азимутальной ДНА, на вход фильтра обработки поступают сигналы от целей на разных доплеровских частотах в зависимости от их удаления от плоскости, нормальной к вектору скорости РСА в момент съемки. Ширина спектра сигнала от каждой цели в соответствующее число раз меньше полной полосы сигнала, а амплитуда может быть ослабленной, если направление на цель в данном кадре съемки находится на склоне азимутальной ДНА. Эту ситуацию иллюстрирует рис. 4.3,б, на котором видно, что для целей, удаленных от максимума ДНА, отношение мощности сигнала к помехе неоднозначности резко падает. Поэтому значение коэффициента запа-

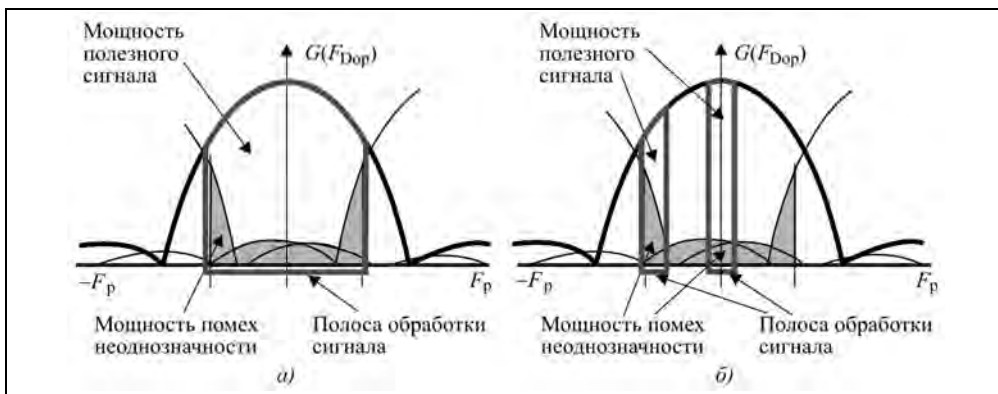


Рис. 4.3. Соотношения между интегральными мощностями сигнала и помех неоднозначности в маршрутном режиме (а) и в режиме Скансар (б)



са на неоднозначность по азимуту в режиме Скансар следует брать большим  $k_x \sim 1,5$ , чем в маршрутном режиме.

Новая разновидность режима Скансар – TOPSAR (TOPS – Terrain Observation by Progressive Scans), при котором в процессе обзора парциальной зоны сканируют лучом по азимуту, как в прожекторном режиме, но в обратную сторону [518]. При этом в каждом скане сигналы от каждой цели принимают с полным спектром доплеровских частот, как при простом расширении азимутального луча. Появляющаяся неоднозначность сигналов по азимуту, характер которой известен по значению мгновенного отклонения луча от нормали в каждом скане (в отличие от расширенного луча), устраняется при синтезе РЛИ. В результате формируется РЛИ с несколько худшим разрешением и отношением сигнал/шум, но с равным амплитудным распределением и более пригодным для интерферометрической обработки. Близкий эффект достигается при сканировании луча в направлении, обратном полету (как в прожекторном режиме – инверсный режим TOPSAR), но угол сканирования должен быть больше.

#### **4.1.3. Прожекторный режим обзора**

Основной недостаток маршрутного режима состоит в том, что нельзя получить азимутальное разрешение лучше, чем половина горизонтального размера антенны (уточнение для высокоорбитальных РСА приведено в гл. 5). Это ограничение можно преодолеть в кадровом прожекторном режиме, показанном на рис. 4.1,в. В процессе движения КА по траектории луч антенны вращают по азимуту, направляя его в центр снимаемого участка местности (кадра). Выигрыш во времени синтеза используют для улучшения азимутального разрешения, а также для получения нескольких независимых наблюдений и улучшения радиометрического разрешения путем некогерентного накопления наблюдений.

Изменение направления луча реализуют путем программного разворота КА по курсу (РСА TECSAR [385, 422]), а также применением антенн со сканированием луча в горизонтальной плоскости: гибридной зеркальной антенны (РСА КА «Кондор-Э», см. гл. 12, 13) или антенн типа АФАР (большинство современных РСА, см. гл. 13).

*В прожекторном режиме принимаемый сигнал имеет ряд особенностей, которые связаны с тем, что, по существу, имеем сочетание строго бокового обзора (нуль доплеровской частоты в центре луча ДНА) в середине интервала обработки со скошенным обзором на краях синтезированной апертуры:*

- ширина спектра доплеровских сигналов, принимаемых от участка местности, облучаемого антенной РСА в каждый момент времени (мгновенный доплеровский спектр) такая же, как и в маршрутном режиме и равна  $\Delta F_{\text{Dop}} = 2V_{\text{sg}} / D_{\text{хant}}$ , что позволяет выбирать частоту повторения зондирующего сигнала, как в маршрутном режиме. Расчет частоты повторения и других параметров РСА ведется так же, как для маршрутного режима по формуле (3.71) с учетом выбранного размера антенны по конструктивным соображениям, исходя из обеспечения энергетического потенциала, полосы съемки и полосы обзора (см. разделы 3.5 и

3.6). Параметры прожекторного режима отличаются от маршрутного временем обработки, длиной синтезированной апертуры и числом когерентно и некогерентно суммируемых импульсов;

- средняя доплеровская частота спектра сигналов изменяется по времени, примерно по линейному закону, причем интервал изменения частоты в несколько раз превышает ширину мгновенного спектра. Поэтому записанная в ОЗУ радиоголограмма прожекторного режима содержит несколько интервалов неоднозначности по азимуту, как это иллюстрирует рис. 3.23 гл. 3, а также вид двумерной радиоголограммы, приведенной на рис. 4.4. Положение «крестов» соответствует значениям доплеровской частоты, кратным частоте повторения зондирующего сигнала. Поскольку полоса доплеровских частот от облучаемого антенной РСА участка местности меньше частоты повторения  $F_p$ , отличие принимаемой частоты сигнала по азимуту (в пределах  $\pm F_p/2$ ) от истинной доплеровской частоты и вызванная этим многозначность не даст ложных целей. Закон изменения средней частоты известен, условие обобщенной теоремы Котельникова о соотношении полосы спектра сигнала и частоте дискретизации не нарушается и возможно восстановление непрерывности исходного закона изменения доплеровской частоты принимаемого сигнала, например, путем гетеродинирования с ЛЧМ-процессом, интерполяцией отсчетов на повышенную частоту и обратным гетеродинированием. Временные зависимости параметров принимаемого сигнала детально рассмотрены в гл. 5 и 6;
- интервал дискретизации отсчетов радиоголограммы по азимуту в несколько раз превышает азимутальное разрешение РЛИ. Для отображения такого РЛИ требуется в процессе синтеза РЛИ повысить частоты дискретизации, например, методом интерполяции (см. выше);
- на краях радиоголограммы резко возрастает миграция дальности (рис. 4.4). Может оказаться, что величина миграции сигнала от цели за период зондирования превысит шаг квантования по дальности, так, что в отдельных отсчетах дальности сигналы от цели будут отсутствовать, и радиоголограмма будет разрушаться. В первую очередь это проявится в возрастании интегрального уровня боковых лепестков синтезированной ДНА, оценка которого проведена в [431\*].

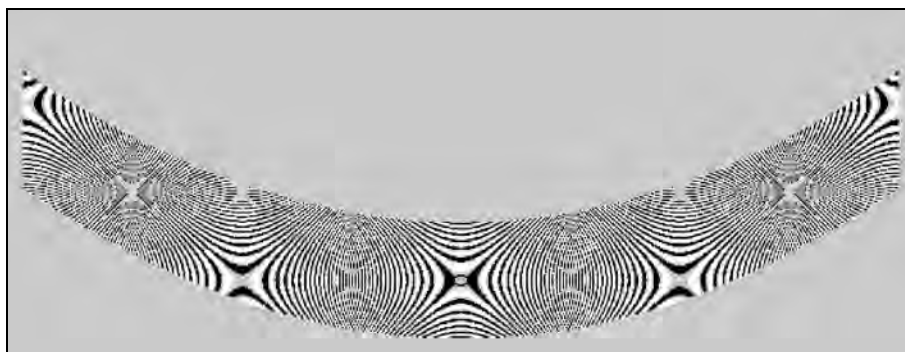


Рис. 4.4. Вид радиоголограммы прожекторного режима

Обычно в прожекторном режиме амплитуда принимаемых от местности сигналов постоянна по времени. Она максимальна для центра кадра и уменьшается к краям снимаемого кадра в соответствии с формой ДНА, ограничивающей размер снимаемого кадра по азимуту. Возможен, так называемый, прожекторный режим «с протяжкой», при котором луч антенны не строго следит за центральным объектом, а «скользит» относительно него с отставанием от точного слежения. В этом режиме амплитуды принимаемых по полю кадра сигналов меняются по времени, но при этом он позволяет несколько увеличить размер кадра по азимуту.

Приведенные выше особенности сигналов в прожекторном режиме должны учитываться в алгоритмах синтеза РЛИ (см. гл. 6).

#### **4.1.4. Поляриметрические режимы радиолокационной съемки**

Поляриметрические режимы являются синхронной съемкой с комбинацией различных поляризаций при излучении и приеме. Их техническая реализация зависит от решаемой задачи дистанционного зондирования, особенностей построения конкретной аппаратуры РСА с учетом ограничений, связанных с принципом работы РСА. Обычно используют линейно поляризованные сигналы, излучаемые и принимаемые антенными устройствами с линейными горизонтальной (Г) и вертикальной (В) поляризациями. При проектировании современных РСА предусматривают полнополяриметрические режимы, обеспечивающие прием и регистрацию четырех (Quad-pol) сочетаний поляризаций излучения и приема, составляющих матрицу Стокса ГГ+ГВ+ВВ+ВГ, а также сокращенные режимы с регистрацией сигналов двух (Dual-pol) сочетаний поляризаций: ГГ+ГВ, ВВ+ВГ или ГГ+ВВ [80]. Выходной информацией РСА в таких режимах являются КРЛИ, по которым можно измерять отношения между амплитудами компонентов матрицы Стокса, разности фаз между ними, а также вести интерферометрическую обработку поляриметрических данных (режим PolInSAR).

Наиболее информативным инструментом поляриметрического зондирования является поляриметрическая интерферометрия (PolInSAR), основанная на анализе полнополяриметрической матрицы. Применительно к мониторингу лесных массивов она позволяет оценивать высоту деревьев, вести многослойное топографическое картирование.

В отличие от полнополяриметрического режима или комбинации ГГ+ВВ реализация режимов с двумя поляризациями ГГ+ГВ или ВВ+ВГ (сокращенная запись – ГГВ, ВВГ) предъявляет значительно меньшие требования к аппаратуре РСА. Сигнал передатчика (или выходы мощных усилителей модулей АФАР) подключают к антенне (излучателям) требуемой поляризации (Г или В). Принятый антеннами двух (Г и В) поляризаций сигнал усиливают в двух приемных каналах и далее после оцифровки подают на линию передачи данных. Для поляриметрических режимов поток информации, передаваемой по радиолинии, возрастает, что обычно компенсируют ухудшением пространственного разрешения.

В режиме четырех поляризаций радиолокатор работает на удвоенной частоте повторения с череспериодным чередованием поляризации излучения, прием и усиление сигналов ведут как в рассмотренном выше случае. Повышение частоты повто-

#### Глава 4. Режимы работы космических РСА

рения зондирующих сигналов приводит к появлению неоднозначности сигналов по дальности, что ограничивает полосу съемки в области больших углов падения.

Вариантом получения частичной информации о составляющих матрицы Стокса без удвоения частоты повторения может быть режим, который по аналогии с режимом Скэнсар можно назвать «Скэнпол». Съемку с приемом двух поляризаций проводят кадрами длительностью, примерно в три раза меньшей времени облучения целей по азимуту, меняя поляризацию излучения от кадра к кадру. После синтеза КРЛИ будут получены две поляриметрические пары ГГВ и ВВГ изображений, пригодные для измерений отношения амплитуд и разности фаз с тем отличием, что в соседних кадрах флуктуации сигналов будут некоррелированы, и для повышения точности измерений потребуется их сглаживание (некогерентное накопление) по площади наблюдаемых протяженных объектов.

Необходимость использования в поляриметрических режимах двух приемных каналов, как правило, не слишком усложняет бортовую аппаратуру, поскольку при проектировании РСА космического базирования обязательно предусматривают резервирование основных блоков, и усложнение касается только коммутационных устройств. При выходе из строя одного из каналов сокращаются функциональные возможности бортового комплекса, но в целом живучесть сохраняется.

Применительно к мини-спутникам с АФАР требование наличия двух приемных каналов в модулях может оказаться невыполнимым из-за превышения общей массы аппаратуры. В таких случаях реализация режима двухполяризационного зондирования в комбинациях ГГВ, ВВГ или ГГ+ВВ возможна путем череспериодного переключения поляризаций при излучении и приеме с работой на удвоенной частоте повторения.

В связи со сложностями работы в полнополяриметрическом режиме применяют «компактный режим» (СР – compact polarimetry), при котором излучают линейно поляризованную волну с углом наклона плоскости поляризации  $45^\circ$  [321, 377, 471]. Технически такой режим реализуют в РСА с АФАР, разделяя на две группы по вертикали управление приемопередающими модулями (ППМ) при передаче: одна группа излучает горизонтальную, а другая – вертикальную поляризацию. Введением дополнительного сдвига фазы в одной из групп ППМ на  $\pm 90^\circ$  можно получить зондирующий сигнал с круговой поляризацией. Прием ведут как обычно – двумя каналами Г и В поляризаций.

В результате в режиме СР  $\pi/4$  в приемных каналах оказываются суммы сигналов с согласной и кроссполяризованной компонентами:

$$\begin{aligned} \dot{U}_H &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ S_{HH} e^{j\varphi_{HH}} + S_{VH} e^{j\varphi_{VH}} \right\}; \\ \dot{U}_V &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ S_{VV} e^{j\varphi_{VV}} + S_{HV} e^{j\varphi_{HV}} \right\}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Для круговой поляризации излучения имеем аналогичные соотношения.

Как и в полнополяриметрическом режиме в компактном режиме информативными признаками являются отношения амплитуд и разность фаз мощных комплексных составляющих ГГ и ВВ поляризаций с дополнением к ним низкого уров-

ня (минус 7...10 дБ) кроссполяризованных компонентов. При таком соотношении амплитуда кроссполяризованной компоненты составляет 0,3...0,45 от параллельной компоненты. Поэтому в комбинации компонент амплитуда суммарного сигнала может изменяться в пределах 55...145 %, а фаза – до  $\pm 24^\circ$ . Комбинация поляризаций существенно повышает вероятность идентификации типа подстилающих поверхностей, имеющих симметричные кроссполяризованные компоненты ГВ и ВГ, что характерно, например, для растительного покрова.

Применение компактного поляриметрического зондирования позволяет избежать ограничений, типичных для полнополяриметрического режима, при снижении вероятности распознавания типа поверхности не более единиц процентов. Особо заметны преимущества компактного представления поляриметрических данных при поляриметрической интерферометрии, требующей удвоения объема данных для тематической обработки.

#### **4.1.5. Интерферометрическая радиолокационная съемка**

Интерферометрическая съемка предусматривает получение набора (двух и более) КРЛИ заданной территории при совпадающих или близких условиях наблюдения, определяемых интерферометрической базой. В зависимости от решаемой задачи база может располагаться поперек линии пути (построение карт рельефа, топографическое картирование), вдоль линии пути (индикация движущихся целей) или определяться временным интервалом между съемками (временная база дифференциальной интерферометрии для измерения малых смещений земной коры и изменения геометрии объектов, а также для выявления изменений в оперативной обстановке). Информация, извлекаемая при интерферометрической обработке, содержится в разности фаз в каждом пикселе РЛИ, вычисляемой через произведение комплексных отсчетов одного КРЛИ на комплексно-сопряженные отсчеты второго КРЛИ

$$\varphi(X, Y) = \arctg \left\{ \frac{\text{Im}(\dot{U}_1 \dot{U}_2^*)}{\text{Re}(\dot{U}_1 \dot{U}_2^*)} \right\}. \quad (4.8)$$

Используют интерферометрию с «жесткой» базой, при которой передатчик и два приемных канала с независимыми антеннами размещаются на одном КА, и с «мягкой» базой в виде тандемов КА, двигающихся по близким параллельным орбитам или путем съемки на другом витке кратно повторяющейся орбиты (межвитковая интерферометрия).

Основное требование к получаемым парам КРЛИ – их пригодность к когерентной обработке. Ее характеризуют коэффициентом когерентности. Этот комплексный параметр называют «интерферометрической когерентностью»

$$\gamma_{\text{cог}} = \frac{\langle z_1 z_2^* \rangle}{\sqrt{\langle z_1 z_1^* \rangle \langle z_2 z_2^* \rangle}}, \quad (4.9)$$

где  $z_1, z_2$  – комплексные коэффициенты обратного рассеяния, рассчитанные по первому и второму КРЛИ, угловые скобки означают усреднение по объекту наблюдения.

Нарушение когерентности КРЛИ может быть вызвано увеличением размера базы, при котором в дополнительный приемный канал попадают сигналы не от максимума главного лепестка диаграммы обратного рассеяния (ДОР) каждого элемента разрешения на местности или группового объекта, а из области, где сказываются флуктуации сигналов, вызванные интерференцией элементарных отражателей, попадающих в элемент разрешения РСА. Критический размер базы, когда когерентность нарушается, составляет от сотен метров до километров в зависимости от диапазона волн и разрешающей способности РСА.

Преимущества жесткой базы – ее фиксированный размер. В РСА SRTM КА Space Shuttle [521], предназначенном для топографического картирования, реализована сложная уникальная конструкция с выдвижной 60-метровой штангой, на которой установлены выносная двухдиапазонная приемная ФАР, а также лазерная и телевизионная аппаратура контроля геометрии. Размер базы значительно меньше критического, что ограничивает точности измерения разности фаз.

Примером создания жесткой базы вдоль линии пути являются РСА с секционными АФАР, в которых сигналы от каждой секции усиливаются в разных каналах. Такую распределенную систему можно использовать для пространственно-временной обработки сигналов (STAP – Space–Time Adaptive Processing) с целью индикации движущихся целей. Однако и в этом случае конструктивные соображения ограничивают размеры интерферометрической базы и соответственно пороговое значение и точность измерения скоростей целей.

Преодоление указанных ограничений достигается использованием интерферометрии с мягкой базой, один из вариантов которой – создание орбитальной группировки в виде синхронного тандема спутников, движущихся по параллельным орбитам со смещением поперек и вдоль линии (TanDem-X, Radarsar-2 и Radarsat-3 [276, 317, 370, 372]). Такая конфигурация пригодна для продольной и поперечной интерферометрии, но в последнем случае следует учитывать изменения размера базы в пределах каждого витка, особенно при полярных орбитах. Особые требования предъявляются к точности измерения размеров и углового положения базы между спутниками, что требует применения прецизионной бортовой аппаратуры позиционирования и уточнения данных по наземным средствам траекторных измерений и путем анализа записанных радиоголограмм.

Геометрия интерферометрической съемки с использованием тандемов КА показана на рис. 4.5. Спутники движутся по близким орбитам. В текущий момент времени положение спутников в точках  $A_1$  и  $A_2$  образует интерферометрические базы – поперечную  $B_y$  и продольную  $B_x$ . Обычно один из спутников ( $A_1$ ) работает в активном режиме излучения и

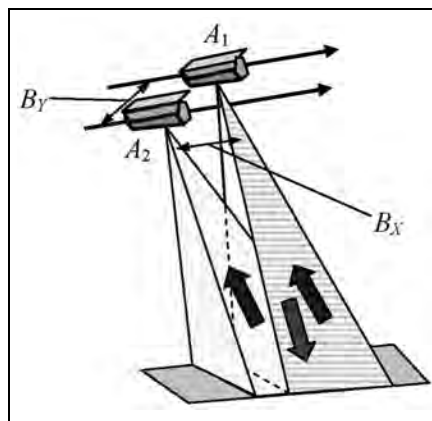


Рис. 4.5. Интерферометрическая съемка с использованием тандемов КА [370]

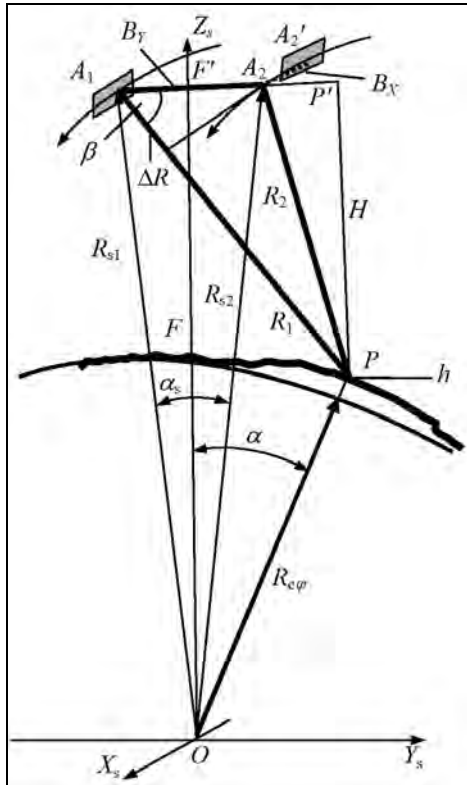


Рис. 4.6. Геометрия интерферометрической съемки тандемом КА

- наклонные дальности  $R_1$  и  $R_2$  до точек на земной поверхности, соответствующие пикселям полученных АРЛИ;
  - разность наклонных дальностей  $\Delta R = R_{s1} - R_{s2}$ , измеренная фазометрическим методом с высокой точностью по паре КРЛИ.
- Выходными данными расчетов должны быть:
- географическая координата каждой точки РЛИ в сечении  $X=0$  (в плоскости визирования), для вычислений которой требуется знание угла  $\alpha$ ;
  - высота рельефа относительно радиуса референц-эллипсоида  $R_{сф}$  на географической широте района съемки.

Размер базы поперечной интерферометрии определяется выражением

$$B_Y = \sqrt{R_{s1}^2 + R_{s2}^2 - 2R_{s1}R_{s2} \cos \alpha_s} \approx \alpha_s (R_{s1} + R_{s2})/2. \quad (4.10)$$

При равенстве радиусов орбит обоих КА база интерферометрии горизонтальна, иначе она наклонена на малый угол

$$\delta_B = \arcsin\left(\frac{R_{s1} \sin \alpha_s}{B_Y}\right) + \frac{\alpha_s}{2} - \frac{\pi}{2}. \quad (4.11)$$

приема, а второй ( $A_2$ ) пассивный – только в режиме приема. Размеры интерферометрических баз должны удовлетворять условию когерентности (4.9).

В данном разделе рассматриваем поперечную интерферометрию для построения карт рельефа (рис. 4.6). Примем, что ось  $Z_s$  направлена в зенит и проходит через середину центрального угла  $\alpha_s$  (центр орбитальной группировки). Ось  $X_s$  параллельна вектору путевой скорости КА, ось  $Y_s$  дополняет систему до правой при левостороннем обзоре и до левой – при обзоре правым бортом. Плоскость визирования  $OY_sZ_s$ , перпендикулярная вектору путевой скорости, соответствует нулевой доплеровской частоте при синтезе РЛИ.

**Входными данными для расчетов** являются:

- полученные по данным траекторных измерений и датчиков позиционирования радиусы орбит КА  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ , центральный угол  $\alpha_s$  формирования интерферометрической базы, текущие географические координаты следа  $F$  центра орбитальной группировки;

#### Глава 4. Режимы работы космических РСА

Для упрощения выкладок примем, что радиусы орбит КА в тандеме одинаковы, тогда линия  $A_1P'$  горизонтальна, а линия  $PP'$  параллельна оси  $OZ_s$ . Координату точки  $P$  относительно базовой линии  $A_1P'$  находят решением прямоугольного треугольника  $A_1PP'$  с гипотенузой  $R_1$  и прилежащим углом  $\beta$ , вычисленным через разность наклонных дальностей  $\Delta R$

$$\beta \approx \arccos(\Delta R/B_Y). \quad (4.12)$$

Отсюда получаем соотношения для координаты точки  $P$ :

$$X_P = 0;$$

$$Y_P = F'P' = R_1 \cos \beta - B_Y/2 = \frac{\Delta R R_1}{B_Y} - B_Y/2; \quad (4.13)$$

$$Z_P = R_{s1} \cos(\alpha_s/2) - R_1 \sin \beta.$$

Для высоты рельефа относительно референц-эллипсоида имеем

$$h = \sqrt{Z_P^2 + Y_P^2} - R_{e\varphi}. \quad (4.14)$$

Центральный угол  $\alpha$  для вычисления удаления точки наблюдения от трассы КА находим из выражения

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{Y_P}{R_{e\varphi} + h}\right). \quad (4.15)$$

В возможном варианте расчета выражают  $R_{s2} = R_{s1} - \Delta R$ , а далее решают треугольник по трем сторонам с вычислением высоты  $H = 2\sqrt{p(p-B_Y)(p-R_1)(p-R_2)}/B_Y$  и угла  $\beta = \arccos(\sqrt{R_1^2 - H^2}/R_1)$ , где  $p = (B_Y + R_1 + R_2)/2$  – полупериметр треугольника  $A_1A_2P$ .

Соотношения, аналогичные приведенным выше, справедливы и для случаев межвитковой интерферометрии, когда изображения получают независимо с помощью одного или разных КА. Непременное требование – соблюдение базы интерферометрии, при которой сохраняется когерентность пар КРЛИ. Обычно используют повторяющиеся орбиты с циклом 11–21 суток. Из-за влияния разных факторов (например, медленного снижения) точного совпадения орбит не происходит и может образоваться требуемая интерферометрическая база. В ряде случаев управляют параметрами орбиты, сокращая цикл повторения до двух–трех суток. Причиной разрушения когерентности могут быть временные изменения обстановки (суточная или сезонная изменчивость). Более стабильна интерферометрия в дециметровых  $S$ - и  $L$ -диапазонах волн.

Межвитковая съемка с повторяющихся орбит может применяться для дифференциальной интерферометрической обработки – когерентным методам выявления изменений в окружающей обстановке, оценке подвижек земной коры, изменений геометрии инженерных сооружений путем сопоставления полученных в разное время фазовых изображений.



## 4.2. Расширенные режимы обзора космических РСА

Бурное развитие радиолокационной техники и технологий привело к широкому использованию активных фазированных антенных решеток (АФАР) в космических РСА. При этом выявились возможности не только гибкого управления лучом, но и цифрового формирования ДНА, а также построения многоканальных приемных систем, использующих секционное разбиение АФАР с применением методов пространственно-временной обработки сигналов для индикации движущихся целей. Это дало возможность разработать новые принципы построения космических РСА, существенно расширяющие их информационные возможности.

### 4.2.1. Метод двойного приема

Применение секционной АФАР позволяет повысить разрешающую способность РСА по азимуту в маршрутном режиме, так называемым методом «двойного приема» (dual-recvie mode of operation), реализованным в РСА нового поколения Radarsat-2 и TerraSAR-X [265, 268, 333, 334, 402, 481, 501]. Этот метод позволяет при горизонтальном размере антенны 15 м в РСА Radarsat-2 достичь высокого разрешения 3×3 м (режим Ultra Fine mode) в полосе 20 км при углах падения 30...40°. Такой режим по сравнению с прожекторным режимом имеет несколько меньший энергетический потенциал, поскольку требует расширения луча антенны при излучении и не позволяет реализовать некогерентное накопление, но зато он позволяет вести съемку длинных маршрутов, а не выборочных кадров. На практике могут применяться оба режима работы [481].

Принцип действия режима двойного приема иллюстрирует рис. 4.7. Рассматриваются два положения РСА в соседних периодах зондирования. При передаче сигнал излучают полной АФАР с фазовыми центрами 1 и 2 в первом и втором зондированиях. Прием ведут двумя независимыми секциями антенны, фазовые центры секций разнесены на половину размера АФАР. Период повторения выбирают таким обра-

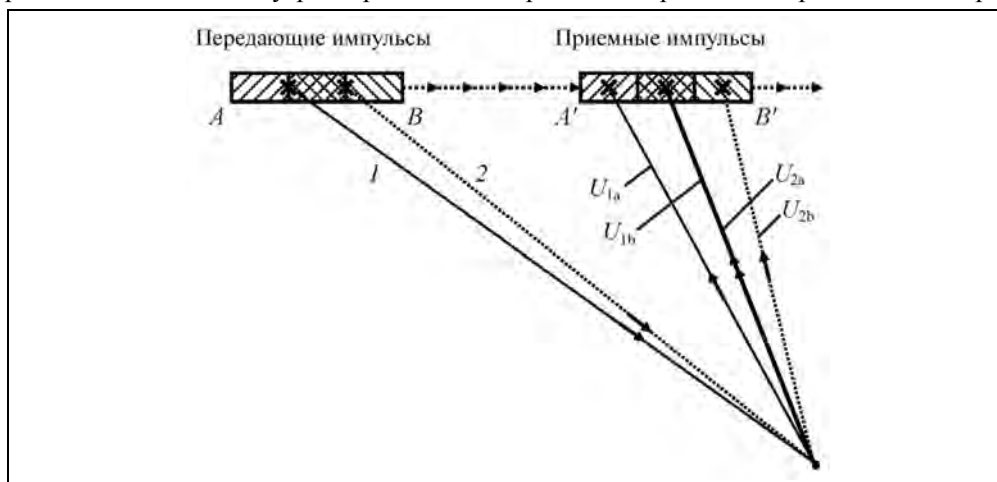


Рис. 4.7. Принцип действия режима двойного приема

#### Глава 4. Режимы работы космических РСА

зом, чтобы антенна перемещалась из положения 1 в положение 2 на половину своей длины. Сигналы  $U_{1a}$  и  $U_{1b}$  от первого зондирования и  $U_{2a}$  и  $U_{2b}$  от второго зондирования принимаются секциями антенны независимо, а далее формируют радиоголограмму на виртуальной удвоенной частоте повторения.

Это происходит следующим образом. Допустим, что ведется прием только правой секцией  $A'$  АФАР, тогда радиоголограмма состоит из последовательности отсчетов на реальной частоте повторения  $U_i=U_{1a}, U_{2a}, \dots$ . Сигналы, принятые секцией  $B'$ , будут иметь запаздывание, такое же, как если бы РСА находилась бы посередине между двумя зондированиями. Эти отсчеты можно вставить в суммарную радиоголограмму. Тогда с выходов двух приемников получим совмещенную голограмму для синтеза РЛИ на удвоенной (виртуальной) частоте повторения:  $U_i=U_{1b}, U_{1a}, U_{2b}, U_{2a}, \dots$ .

На рис. 4.8 приведена модель формирования радиоголограммы двойного приема для РСА  $L$ -диапазона волн с горизонтальным размером антенны 12 м. Сплошная линия соответствует полной радиоголограмме, точки – реальным отсчетам сигналов с секции  $A'$  с частотой повторения  $F_p=1200$  Гц, равные азимутальному смещению РСА за период зондирования 6 м, окружности обозначают «виртуальные» отсчеты голограммы, использующие сигнал с секции  $B'$ . «Виртуальная» частота повторения радиоголограммы равна 2400 Гц. На рис. 4.9 приведены доплеровские спектры сигналов для обычного маршрутного режима и режима двойного приема.

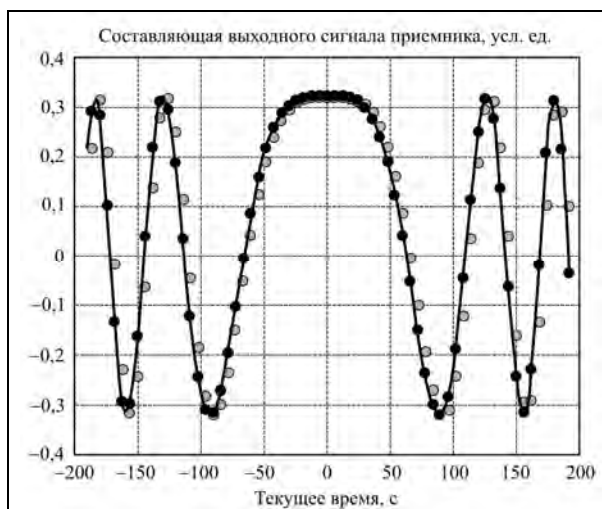


Рис. 4.8. Формирование радиоголограммы двойного приема:  
• – отсчеты сигнала, принятые секцией  $A'$  антенны;  
o – отсчеты от секции  $B'$

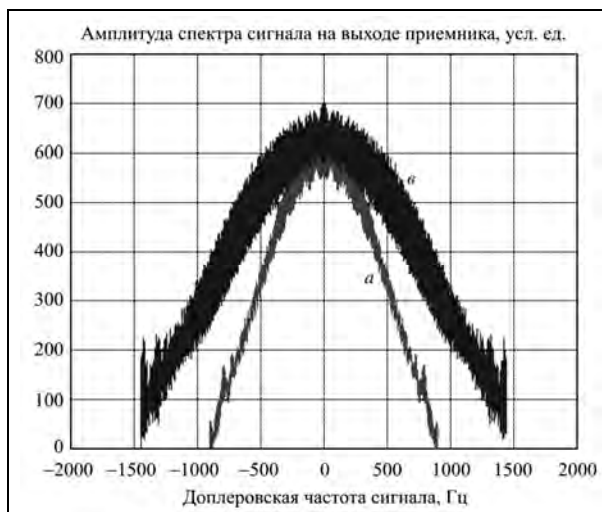
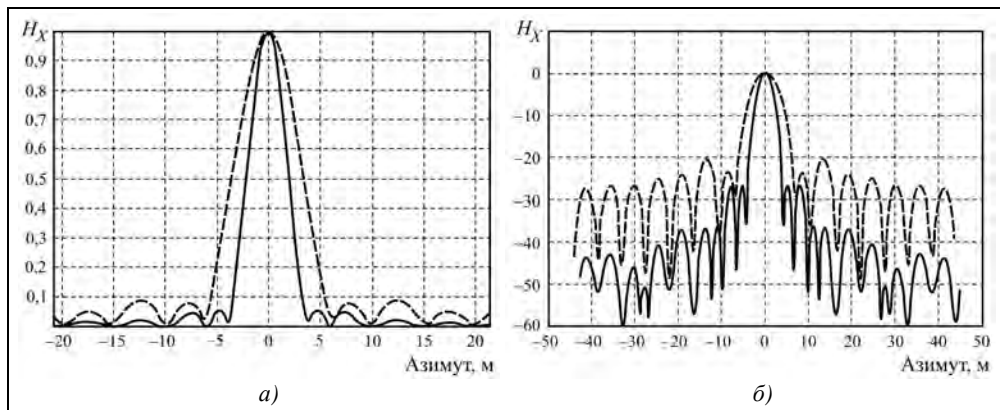


Рис. 4.9. Доплеровские спектры сигналов для обычного маршрутного режима (a) и режима двойного приема (б)

На рис. 4.10 приведены результаты расчета формы нормированного отклика по азимуту в маршрутном режиме (разрешение по азимуту ~6 м) и в режиме двойного приема (разрешение по азимуту 3 м) для РСА *L*-диапазона волн. Благодаря естественному амплитудному взвешиванию уровень боковых лепестков отклика в режиме двойного приема значительно ниже, чем в маршрутном режиме (при котором амплитудное взвешивание сопровождается расширением главного лепестка импульсного отклика).



**Рис. 4.10.** Расчетные формы отклика по азимуту в маршрутном режиме (пунктир) и в режиме двойного приема (сплошная линия):  
*a* – линейный масштаб; *б* – логарифмический масштаб в децибелах

Заметим, что в рассмотренном методе двойного приема с улучшенной разрешающей способностью по азимуту снижение энергетического потенциала РСА по сравнению с маршрутным режимом невелико – только за счет расширения ДНА на передачу. На прием потери в отношении сигнал/шум отсутствуют, так как после независимого усиления в приемных каналах происходит когерентное суммирование сигналов от секций антенны, аналогичное суммированию в СВЧ-тракте при одноканальном построении РСА. Преимущество режима двойного приема по сравнению с прожекторным режимом – возможность проведения маршрутной съемки с высоким пространственным разрешением. Но в прожекторном режиме при съемке малоразмерного кадра можно реализовать значительно больший энергетический потенциал РСА за счет увеличения времени съемки и сочетания когерентного и некогерентного накопления при получении выходного РЛИ.

#### **4.2.2. Широкозахватные режимы с высоким разрешением**

Выполнение жестких требований, обеспечивающих однозначность принимаемых сигналов по азимуту (выбор горизонтального размера антенны и частоты повторения, см. раздел 3.5) и по дальности (рекуррентная дальность и ширина ДНА по углу места, см. раздел 3.6), в конечном счете определяет необходимую площадь антенны

$$S_{\text{ant}} = D_{x\text{ant}} D_{y\text{ant}} > \frac{4k_x k_r V_{\text{sg}} R \lambda \operatorname{tg} \gamma_i}{c}, \quad (4.16)$$

#### Глава 4. Режимы работы космических РСА

где  $D_{xant}$  и  $D_{yant}$  – горизонтальный и вертикальный размеры антенны;  $V_{sg}$  – путевая скорость платформы;  $R$  – наклонная дальность;  $\lambda$  – длина волны РСА;  $\gamma_1$  – заданный максимальный угол падения, определяющий дальнюю границу полосы обзора относительно следа КА;  $c$  – скорость света;  $k_x$  и  $k_r$  – коэффициенты запаса по азимуту и дальности.

Это условие ограничивает возможности одновременного расширения полосы съемки и разрешающей способности РСА по азимуту. Основное препятствие к увеличению полосы съемки в космических РСА связано с неоднозначностью сигналов по дальности. Выбираемый из условия однозначности сигналов по азимуту период повторения зондирующего сигнала оказывается меньше, чем разность времени задержки сигнала между началом и концом полосы съемки. Увеличение периода повторения, легко достигаемое в некогерентных космических РБО (частота повторения 100...200 Гц), в когерентных РСА ограничено требованиями теоремы Котельникова по воспроизведению широкого спектра доплеровских частот сигналов, вызванного большими орбитальными скоростями КА – носителя РСА.

Применение секционированной АФАР позволяет получить высокую разрешающую способность по азимуту в РСА с широкой полосой съемки (HRWS – High Resolution Wide swath [308, 325–327, 371, 441, 480, 483, 500, 512]). Предложенные методы являются естественным развитием метода двойного приема и заключаются в использовании многоканальных на прием устройств, подключенных к секциям антенны, и применении цифрового формирования суммарной ДНА. Как правило, ДНА на передачу перекрывает всю зону наблюдения по углу места, а по азимуту – зону, необходимую для получения заданного разрешения. Расширение полосы съемки в сочетании с высоким разрешением по азимуту достигается

- 1) увеличением горизонтального раскрыва антенны с понижением частоты повторения и применением метода многоканального приема;
- 2) применением многоканального режима Скандар.

В первом случае используют широкий луч на передачу, например, с помощью отдельной зеркальной антенны. Прием ведут, используя многосекционную приемную фазированную антенную решетку, как это показано на рис. 4.11.

Для оптимизации параметров РСА нужно, чтобы скорость платформы  $V$  была такова, чтобы размер шага  $VT_p$  за период зондирования равнялся половине горизонтального размера секции приемной антенны  $\Delta X_{ant}$ . Для антенны, состоящей из  $N$  секций, частоту повторения следует выбирать из условия

$$F_p = \frac{2V}{D_{xant}} = \frac{2V}{N\Delta X_{ant}}. \quad (4.17)$$

Структурная схема приема и обработки сигналов показана на рис. 4.12.

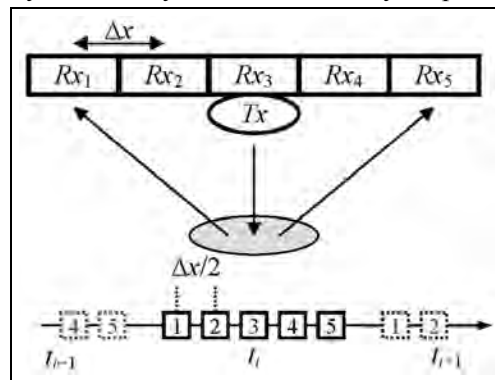


Рис. 4.11. Принцип действия метода многоканального приема для получения высокого разрешения по азимуту [402]

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Она включает в себя секции приемной ФАР, приемники, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), обработку сигналов по азимуту и обычный синтез РЛИ. Цель азимутальной обработки сформировать сигнал на виртуальной частоте повторения путем объединения сигналов от  $N$  секций приемной ФАР. В результате приходим к известному требованию теоремы Котельникова к горизонтальному размеру полной несекционированной антенны  $D_{\text{хant}}=N \times \Delta X_{\text{ant}}$ . В обычных РСА частоту повторения выбирают с некоторым запасом относительно требований, вытекающих из условия (4.17), но в процессе обработки сигналов по азимуту возможно снизить помехи неоднозначности.



Рис. 4.12. Структурная схема обработки сигналов методом многоканального приема с секционированными приемными ФАР (ПФАР)

При этом для обработки сигналов по азимуту используют разные методы. Например, при методе «смещения фазового центра антенны» (Displaced Phase Center Antenna [271]) просто вставляют сигналы от приемных каналов в последовательность отсчетов с виртуальной частотой повторения  $Nf_r$ , как это делается в методе двойного приема. В случаях, когда частота повторения не точно соответствует выражению (4.17), когерентное суммирование выполняют с поправкой фазы, вычисляемой с учетом изменения доплеровской частоты сигнала в области перекрытия спектров [328].

### 4.2.3. Повышение разрешающей способности в поперечном направлении путем межвитковой интерферометрии

**Исходные соотношения.** Применение прожекторного режима съемки позволяет улучшить разрешающую способность РСА вдоль линии пути до долей метра, обратно пропорционально реализованной длине синтезированной апертуры. Имеется возможность улучшения разрешения поперек линии пути сверх предела, ограниченного полосой зондирующего сигнала («сверхразрешение»), путем когерентной обработки КРЛИ, полученных на разных витках с различающимися углами паде-

ния. Предполагается, что за время между съемками не было изменений в окружающей обстановке. Обоснование этого метода дано в статьях [324, 339, 482]. В наиболее компактном виде материал изложен в статье [482], основные положения которой с необходимыми дополнениями приводятся в данном подразделе.

Физические основы метода можно объяснить следующим образом. Известно, что разрешающая способность по наклонной дальности определяется полосой частот зондирующего сигнала. В самолетных РСА известен метод получения высокого разрешения по наклонной дальности путем применения зондирующего сигнала с относительно узкой полосой, но с изменением несущей частоты от импульса к импульсу [100]. При когерентном суммировании сигналов за пачку таких зондирований результирующая ширина спектра зондирования оказывается равной полной ширине излучаемого спектра. При таком режиме работы РСА можно путем перестройки гетеродина от импульса к импульсу использовать узкополосный тракт УПЧ радиолокатора, обеспечивая высокое отношение сигнал/шум при восстановлении истинных значений частот в процессе синтеза КРЛИ.

В рассматриваемом случае межвитковой интерферометрии с разными углами падения мы получаем набор принятых сигналов с разными пространственными частотами. Геометрия наблюдения имеет вид, показанный на рис. 4.13. Излученный радиолокатором сигнал отражается от элементов облучаемой поверхности и формирует КРЛИ с фазовым распределением в соответствии с пространственным волновым числом  $k_{g1}$ . Для монохроматического облучения с частотой  $f_0$  и учетом двойного пути распространения сигналов имеем

$$k_{g1} = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \gamma_{i1} = \frac{4\pi f_0}{c} \sin \gamma_{i1}. \quad (4.18)$$

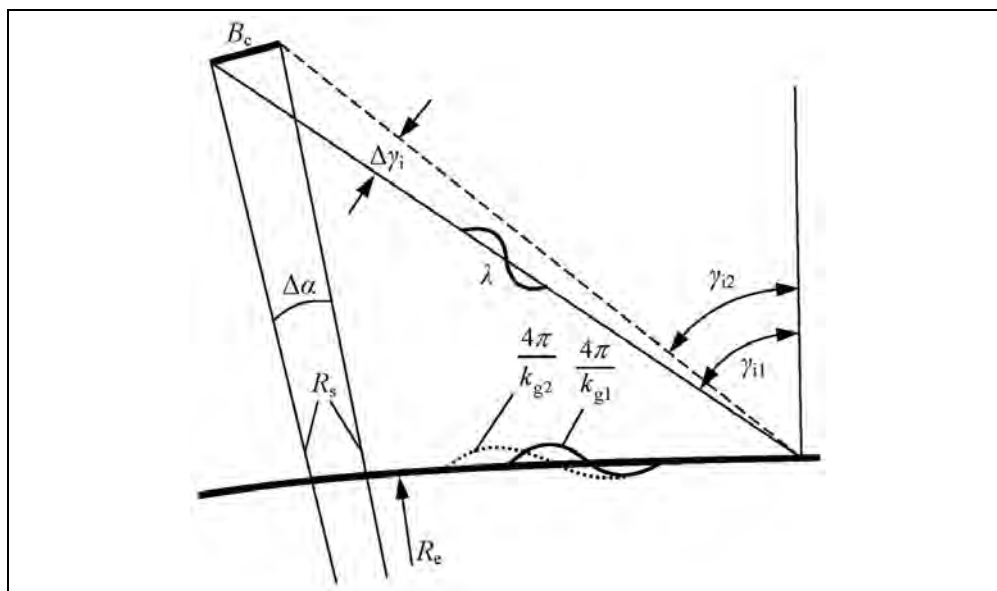


Рис. 4.13. Геометрия наблюдения при разных углах падения

Принятый радиолокационный сигнал формируется всей отражающей поверхностью и является когерентной суммой сигналов, отраженных от ее элементов с соответствующими амплитудами и фазами. При излучении модулированного сигнала (короткие импульсы или импульсы с широкополосной модуляцией с полосой  $\Delta F$ ) взаимодействие спектральных составляющих отраженного сигнала обеспечивает пространственное разрешение по горизонтальной дальности. Такого же эффекта можно достигнуть, если когерентно суммировать сигналы от пространственно разнесенных датчиков с соответствующим перекрытием по волновым числам при разных углах падения и записать формулу (3.09) с дополнительным членом в знаменателе, учитывающим диапазон изменения углов падения  $\Delta\gamma_i$

$$\rho_Y = \frac{2\pi}{\Delta k_g} \approx \frac{c}{2[\Delta F \sin \gamma_i + 2f_0 \cos \gamma_i \sin(\Delta\gamma_i/2)]}, \quad (4.19)$$

где при  $\gamma_i = (\gamma_{i1} + \gamma_{i2})/2$  – среднем угле падения значения волновых чисел на земной поверхности определяются формулой с учетом двойного распространения и проекции горизонтальной дальности на наклонную дальность

$$k_{g1,2} = \frac{4\pi}{\lambda_{1,2}} \sin \gamma_{i1,2} = \frac{4\pi f_{1,2}}{c} \sin \gamma_{i1,2} = \frac{4\pi}{c} (f_0 \pm \Delta F/2) \sin(\gamma_i \pm \Delta\gamma_i/2). \quad (4.20)$$

При малой разности углов падения (малая база интерферометрии) отраженные от местности сигналы когерентны и по разности фаз (сравнение ФРЛИ) можно построить карту рельефа. Если размеры базы возрастают, то отраженные сигналы декоррелируются и возможны два варианта обработки – внутриэлементное некогерентное накопление по дальности с сохранением пространственного разрешения и улучшением радиометрического разрешения или же когерентное суммирование для улучшения разрешения по горизонтальной дальности. Критическое значение разности углов падения (определяющее критическую базу) вычисляем через ширину спектра зондирующих импульсов из выражений (4.19), (4.20)

$$\Delta\gamma_i = \gamma_{i1} - \gamma_{i2} \approx \frac{\Delta F}{f_0} \operatorname{tg} \gamma_{i1}, \quad (4.21)$$

где  $f_0$  – несущая частота зондирующего сигнала.

Используя геометрические соотношения (3.4)–(3.8) дифференцируя зависимость центрального угла  $\alpha$  от угла падения, получим выражение для критического значения базы при межвитковой интерферометрии:

$$B_s = \Delta\gamma_i R_s \left\{ 1 - \frac{\cos \gamma_i}{\sqrt{R_s^2/R_e^2 - \sin^2 \gamma_i}} \right\}, \quad (4.22)$$

где  $R_e$  – локальный радиус Земли;  $R_s$  – радиус орбиты КА.

Так, например, для ERS-1 (несущая частота сигнала  $f_0=5,3$  ГГц, ширина спектра  $\Delta F=15,55$  МГц, высота орбиты  $H_s=785$  км, угол падения  $\gamma_i=23^\circ$ ) критическое значение базы составляет  $B_s=1048$  м, а ее изменения в пределах полосы съемки – от 849 до 1262 м [482]. Для РСА КА «Кондор-Э» (несущая частота  $f_0=3,2$  ГГц, ширина

спектра  $\Delta F=200$  МГц, высота орбиты  $H_s=500$  км и угол падения  $\gamma_1=45^\circ$ ) критическое значение базы значительно больше и равно 56,59 км.

**Алгоритм формирования выходного РЛИ.** Идея сверхразрешения состоит в расширении полосы пространственного спектра сигналов путем комбинирования спектров двух (или большего числа) съемок с различными углами падения при размерах базы, близкой к критической величине. Ее выбирают несколько меньшей, чтобы спектры сигналов перекрывались, хотя это и приводит к уменьшению выигрыша по разрешению. Общую часть спектра (перекрытие) используют для оценки смещения между спектрами. С этой целью можно применить корреляционный анализ.

Формирование выходного РЛИ с повышенным разрешением поперек трассы КА включает несколько этапов:

1) синтез обоих (или большего числа) КРЛИ и их сортировка в порядке возрастания базы. Будем называть одно из них (КРЛИ<sub>1</sub>) ведущим, а второе (КРЛИ<sub>2</sub>) или остальные – дополнительными. По АРЛИ выбирают совпадающие фрагменты по наклонной дальности. Они отличаются масштабами примерно как  $\Delta f/f$  (до 6,25 % в S-диапазоне волн);

2) интерполяция дополнительных КРЛИ по дальности для приведения их к масштабу ведущего КРЛИ или интерполяция всех КРЛИ с приведением к требуемому масштабу по горизонтальной дальности;

3) вычисление спектров по горизонтальной дальности пар смежных КРЛИ и их фильтрация с выделением перекрывающейся области спектров ( $S_{12}$ ), а также двух примыкающих половин  $S_1$  и  $S_2$  суммарного спектра путем режекции половин перекрывающихся частей спектров исходных КРЛИ;

4) получение комплекта КРЛИ после фильтрации: КРЛИ<sub>1вр</sub>, КРЛИ<sub>2вр</sub> из примыкающих спектров – они будут использованы для формирования РЛИ высокого разрешения, а также КРЛИ<sub>1п</sub> и КРЛИ<sub>2п</sub> – из перекрывающихся областей спектра, сравнение которых позволит устранить смещения спектра  $S_1$  по отношению к  $S_2$ . После этой процедуры можно сложить спектры  $S_1$  и  $S_2$ . Аналогичные операции совершают с КРЛИ, полученными при другой величине расширенной базы.

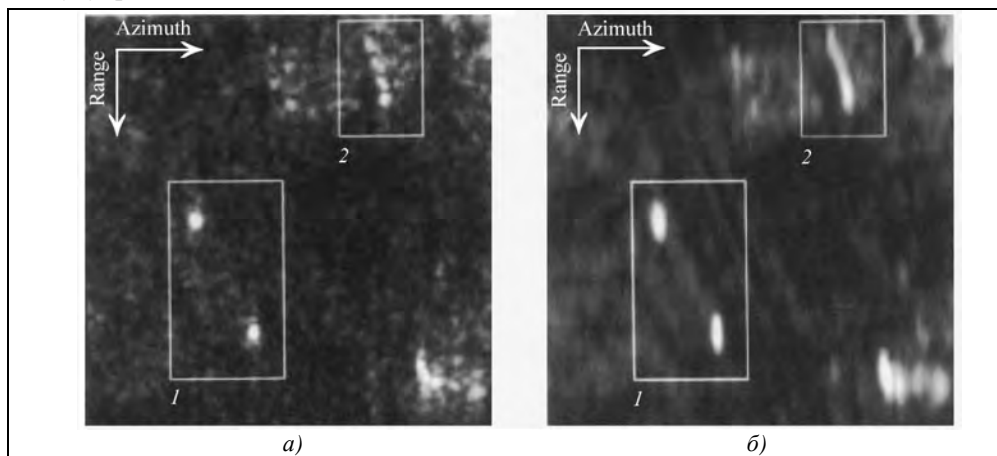
В рассмотренной процедуре получения РЛИ с улучшенным разрешением поперек линии пути возможно некоторое улучшение радиометрического разрешения, если применить некогерентное накопление с КРЛИ, полученным с использованием фрагментов спектра из области перекрытия. Как отмечено в [482], улучшение выходного РЛИ происходит в связи с тем, что на практике эти фрагменты спектров не идентичны, поскольку за интервал между съемками возможны изменения в обстановке. Кроме того, два исходных КРЛИ содержат некоррелированные шумы приемника.

Вместо улучшения пространственного разрешения возможно улучшить радиометрическое разрешение выходного РЛИ путем сложения интенсивностей исходных РЛИ после приведения их к единому масштабу.

На рис. 4.14 приведено сравнение выходных РЛИ с некогерентным накоплением (рис. 4.14,б) и РЛИ со сверхразрешением по дальности (рис. 4.14,а). В проведенном эксперименте использовался набор из девяти КРЛИ, полученных с помощью РСА ERS-1, ERS-2 при разных базах интерферометрии. Достигнуто улучшение



ние поперек линии пути в 2,7 раза (с 32 до 11,9 м) при неизменном разрешении по азимуту, равном 7,5 м.



**Рис. 4.14.** Сравнение выходных РЛИ, полученных в результате когерентной (а) и некогерентной (б) обработки набора снимков, снятых с различием в углах падения: 1 – точечные цели, 2 – групповая цель [482]

Рассмотренная технология может быть применена для получения подробной информации по важным объектам, состояние которых контролируется путем регулярной радиолокационной съемки. Используя прожекторный режим съемки большой продолжительности (с высокими азимутальным и радиометрическим разрешениями) и алгоритмы дифференциальной интерферометрии выявляют изменения в оперативной обстановке, а методом сверхразрешения по дальности – получают изображение неподвижной обстановки на объекте со сверхвысоким разрешением в доли метра.

#### **4.2.4. Режимы индикации движущихся целей**

Одной из важных задач оценки оперативной обстановки в районе радиолокационной съемки является обнаружение движущихся наземных целей. При принятой терминологии эта задача называется *селекцией движущихся целей* (СДЦ) – обнаружение сигналов движущихся сосредоточенных целей путем подавления всех других неподвижных целей и фона местности [118]. В настоящее время эта задача значительно расширена и включает обнаружение одновременно движущихся и неподвижных объектов с измерением их координат и векторов скорости с индикацией на фоне радиолокационного изображения земной поверхности.

В современных самолетных РСА для решения этой задачи применяют методы пространственно-временной обработки сигналов, позволяющие строить на РЛИ траектории движения ДЦ. В космических РСА отношение скорости цели к скорости платформы мало, и цель отображается на РЛИ местности в виде отметки, смещенной по азимуту относительно ее фактического положения. Поэтому речь идет не об обнаружении цели, обычно ее ЭПР значительно превышает ЭПР окружающего фона местности, а об идентификации цели как движущейся. В дальнейшем будем применять общий термин *индикация движущихся целей* (МТИ — moving target indication).

#### Глава 4. Режимы работы космических РСА

В качестве информационных признаков ДЦ можно использовать радиальную и тангенциальную составляющие ее скорости относительного РСА, а также изменение ее положения на РЛИ при двукратном наблюдении.

**Индикация движущихся целей методом продольной интерферометрии.** Наиболее распространен метод индикации движущихся целей по их радиальной скорости, основанный на продольной (вдоль линии пути) интерферометрии сигналов, принятых двумя независимыми антеннами (или секциями антенны). Фазовые центры антенн (секций) должны быть смещены вдоль линии пути КА (метод остановленной фазы). Принцип продольной интерферометрии в космических РСА иллюстрирует рис. 4.15. Учтено, что в отличие от самолетных РСА в космических РСА периоды зондирования, в которых происходит прием сигнала, не совпадают с периодами излучения сигнала.

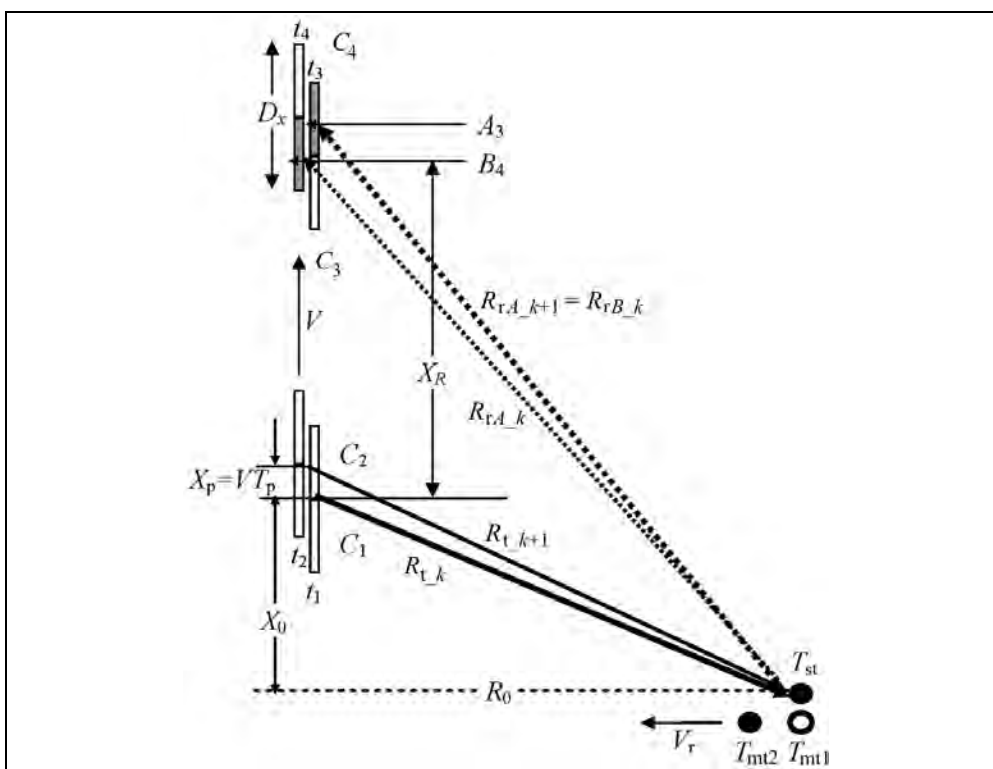


Рис. 4.15. Принцип продольной интерферометрии в космических РСА

Метод интерферометрии вдоль линии пути реализуется при использовании в РСА активной фазированной антенной решетки, разделенной на две или большее число секций. Реализуют многоканальную пространственно-временную адаптивную обработку сигнала (STAR – Space-Time Adapted Processing). Для простоты ограничимся рассмотрением двухсекционной антенны. На передачу сигналы от обеих секций суммируются, а прием и обработка ведутся независимо. Пусть РСА,

оборудованный антенной с горизонтальным размером  $D_{xant}$  и имеющей две секции  $A$  и  $B$ , движется со скоростью  $V_s$ . Фазовый центр передающей антенны, сформированный обеими секциями, занимает последовательно положения  $C_1$  и  $C_2$ . Антенна излучает зондирующие сигналы в направлении целей – неподвижной цели  $T_{st}$  и движущейся с радиальной составляющей скорости  $V_r$  цели, которая в моменты времени  $t_1, t_2$  занимает положения  $T_{mt1}$  и  $T_{mt2}$ .

Спустя интервалы времени, определяемые пространственной задержкой сигнала, в положениях радиолокатора при  $t_1$  и  $t_2$  производится прием сигналов обеими секциям антенны  $A$  и  $B$ . Для реализации данного метода требуется, чтобы период повторения зондирующих сигналов был равен времени прохождения одной четверти длины антенны

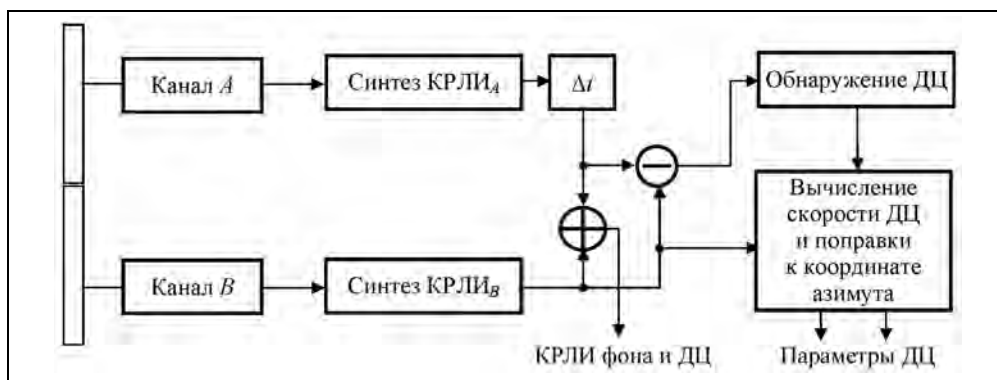
$$T_p = \frac{D_{xant}}{4V_s}. \quad (4.23)$$

где  $V_s$  – путевая скорость КА;  $D_{xant}$  – горизонтальный размер антенны.

Для неподвижной цели длины путей  $C_1T_{st}A_3$  и  $C_2T_{st}A_4$ , а значит и фазы принятого сигнала будут одинаковы (с точностью до малой величины, которой при обзоре, близком к боковому, можно пренебречь). При вычитании сигналов  $A_1$  и  $B_2$  от неподвижных целей и фона местности они компенсируются. Для движущейся цели, имеющей радиальную составляющую скорости  $V_r$ , появится разность фаз

$$\varphi_{V_r} = \frac{4\pi V_r T_p}{\lambda} = \frac{\pi V_r D_{xant}}{V_s \lambda}. \quad (4.24)$$

Рассмотрим *структурную схему системы обработки* сигналов с выходов приемных каналов, подключенных к секциям ФАР, представленную на рис. 4.16. Она включает в себя канал синтеза РЛИ местности и целей и канал селекции движущихся целей (ДЦ) с измерением их радиальных скоростей и вычислением поправок к азимутальной координате. Последнее необходимо, поскольку наличие радиальной скорости целей приводит к смещению отметок от них на РЛИ по азимуту.



**Рис. 4.16.** Структурная схема обработки сигналов для получения РЛИ и индикации движущихся целей с измерением радиальной скорости целей

**Характеристики сигналов в суммарном и разностном каналах РСА.** Сигналы, принятые секциями *A* и *B* антенн в последовательные периоды зондирования *k*, характеризуются фазовыми множителями, обусловленными задержкой на распространение

$$\dot{U}_{A\_k} = U_{m\_k} \exp\left\{-jK_x (R_{t\_k} + R_{rA\_k})\right\}; \quad (4.25)$$

$$\dot{U}_{B\_k} = U_{m\_k} \exp\left\{-jK_x (R_{t\_k} + R_{rB\_k})\right\},$$

где  $K_x = 2\pi/\lambda$  – волновое число; *k* – порядковый номер зондирования ( $-N_{\text{synt}}/2 < k \leq N_{\text{synt}}/2$ , где  $N_{\text{synt}}$  – число синтезируемых импульсов);  $U_{m\_k}$  – амплитуда принятых сигналов (для простоты будем их считать одинаковыми в каналах *A* и *B*);  $R_{t\_k}$ ,  $R_{rA\_k}$ ,  $R_{t\_k}$  и  $R_{rB\_k}$  – дальности распространения сигналов до цели и обратно к секциям антенны при *k*-м зондировании.

Примем, что изменение наклонной дальности цели по временным отсчетам характеризуется квадратичным законом, и пренебрежем составляющими более чем второй степени. Задержки сигнала, принятого от неподвижной цели секцией *A* антенны, определяются наклонной дальностью

$$\begin{aligned} R_{A\_k} &= 2R_0 + \frac{(kV_s T_p - X_0)^2}{2R_0} + \frac{(kV_s T_p + (R_{t\_k} + R_{rA\_k})V_s/c - X_0 + D_{\text{xant}}/4)^2}{2R_0} = \\ &= 2R_0 + \frac{1}{R_0} \left\{ k^2 X_p^2 + kX_p (X_R + X_p) + \frac{1}{2} (X_R + X_p)^2 \right\}, \end{aligned} \quad (4.26)$$

где  $V_s$  – путевая скорость РЛС; *c* – скорость света;  $X_p = V_s T_p = D_{\text{xant}}/4$  – путь РЛС за период зондирования;  $X_R = (R_{t\_k} + R_{rA\_k})V_s/c$  – путь, проходимый РЛС за суммарное время распространения зондирующего сигнала от РЛС до цели и отраженного сигнала до РЛС в ее новом положении. Этот параметр зависит от *k*.

Для упрощения дальнейших записей примем за начало азимутальной координаты точку, в которой цель  $T_{\text{st}}$  находится на траверзе и принято  $X_0=0$ . Для секции *B* будем иметь выражение, отличающееся сдвигом фазового центра приемной секции на  $D_{\text{xant}}/2$

$$\begin{aligned} R_{B\_k} &= 2R_0 + \frac{k^2 X_p^2}{2R_0} + \frac{(kV T_p + X_R - X_p)^2}{2R_0} = \\ &= 2R_0 + \frac{1}{R_0} \left\{ k^2 X_p^2 + kX_p (X_R - X_p) + \frac{1}{2} (X_R - X_p)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Приведем теперь выражение для наклонной дальности цели, принятой секцией антенны *A* в предыдущем зондировании *k*-1. Оно практически совпадает с выражением (4.27) для секции *B* антенны:

$$R_{A\_k-1} = 2R_0 + \frac{1}{R_0} \left( k^2 X_p^2 + kX_p (X_R - X_p) - X_R X_p + \frac{1}{2} (X_R - X_p)^2 \right). \quad (4.28)$$

Выражения (4.27) и (4.28) для условий зондирования из космоса отличаются на малую величину порядка  $X_R X_P / R_0$ , что вызывается изменением положения радиолокатора за время пространственной задержки сигнала из положения  $C_1$  в  $C_3$  на величину  $X_{Rt} = R_t V_s / c$ . При этом фазовые центры приемных секций будут соответственно находиться в положениях  $X_{A1} = X_{R1} + D_{xant} / 4$  и  $X_{B1} = X_{R1} - D_{xant} / 4$ .

Как следует из дальнейшего, необходимо отдельно рассматривать процессы обнаружения ДЦ и измерения ее скорости. Усиление в каналах  $A$  и  $B$  будем считать одинаковым. Парциальные КРЛИ<sub>A</sub> и КРЛИ<sub>B</sub> в пикселях, где формируется отметка от ДЦ, будут включать комплексные сигналы от ДЦ с малой разницей фаз  $\varphi_{Vr}$ , синфазные сигналы от местности и независимые отсчеты шумов. В суммарном КРЛИ будет действовать процесс

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{sum\_mt}} &\approx U_{\text{m\_mt}} \exp\{-j\varphi_{0\text{mt}}\} + U_{\text{m\_mt}} \exp\{-j\varphi_{0\text{mt}} + j\varphi_{Vr}\} + 2\dot{u}_{\text{fon}} + \dot{u}_{\text{nA}} + \dot{u}_{\text{nB}} \approx \\ &\approx 2U_{\text{m\_mt}} \exp\{-j\varphi_{0\text{mt}}\} + 2\dot{u}_{\text{fon}} + \dot{u}_{\text{nA}} + \dot{u}_{\text{nB}}, \end{aligned} \quad (4.29)$$

где  $U_{\text{m\_mt}}$  – амплитуда сигнала от ДЦ;  $2\dot{u}_{\text{fon}}$  – суммарный комплексный сигнал от фона местности в пикселе РЛИ, где зафиксирована смещенная по азимуту отметка от ДЦ;  $\dot{u}_{\text{nA}}$  и  $\dot{u}_{\text{nB}}$  – комплексные отсчеты шума.

После детектирования суммарного КРЛИ получим амплитудное (линейный детектор) или энергетическое (квадратичный детектор) РЛИ, содержащее изображение неподвижных объектов и местности, отметки от ДЦ (смещенные по азимуту) и шумовые отметки.

В разностном канале имеем составляющую от ДЦ, пропорциональную  $\sin \varphi_{Vr} \approx \varphi_{Vr}$  и шумы:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{diff\_mt}} &\approx U_{\text{m\_mt}} \exp\{-j\varphi_{0\text{mt}}\} - U_{\text{m\_mt}} \exp\{-j\varphi_{0\text{mt}} + j\varphi_{Vr}\} + \dot{u}_{\text{nA}} - \dot{u}_{\text{nB}} \approx \\ &\approx -j2U_{\text{m\_mt}} \exp\{-j\varphi_{0\text{mt}}\} \sin \varphi_{Vr} + \dot{u}_{\text{nA}} - \dot{u}_{\text{nB}}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Выполнив операцию детектирования разностного КРЛИ, получим изображение, содержащее шумовые отметки и отметки от ДЦ, которые можно выделить пороговой обработкой.

*Вероятность обнаружения неподвижных или движущихся целей по суммарному РЛИ* определяется отношением сигнал/фон+шум.

*Вероятность идентификации цели как движущейся по разностному РЛИ* зависит от ее отношения сигнал/шум и величины радиальной скорости

$$Q_{T\_sn} = \frac{2U_{\text{m\_mt}}^2 \sin^2 \varphi_{Vr}}{D\{u_n\}}, \quad (4.31)$$

где  $U_{\text{m\_mt}}$  – амплитуда ДЦ в парциальном РЛИ,  $D\{u_n\}$  – дисперсия шума в парциальном РЛИ.

Пороговое значение измеряемой радиальной скорости в зависимости от параметров РСА рассмотрено ниже.

**Оценка значения радиальной скорости ДЦ.** Для выбранных параметров зондирования согласно (4.23) и (4.24) значение радиальной скорости находим через разность фаз по комплексным сигналам парциальных КРЛИ<sub>А</sub> (смещенные на единицу отсчеты по азимуту) и КРЛИ<sub>В</sub>. Учтем малую величину разности фаз в реальных условиях  $\sin \varphi_{Vr} \approx \varphi_{Vr}$ . Для идеального случая отсутствия шумов и при наличии шумов имеем

$$V_r \approx \frac{V_s \lambda}{\pi D_{xant}} \varphi_{Vr} = \frac{V_s \lambda}{\pi D_{xant}} \arg \left\{ \dot{U}_{m_{A-1}} \dot{U}_{m_B}^* \right\}, \quad (4.32)$$

$$V_r = \frac{V_s \lambda}{\pi D_{xant}} \varphi_{Vr} = \frac{V_s \lambda}{\pi D_{xant}} \arg \left\{ \left( \dot{U}_{m_{A-1}} + \dot{i}_{nA} \right) \left( \dot{U}_{m_B}^* + \dot{i}_{nB}^* \right) \right\}.$$

Для оценки ошибки измерения радиальной скорости при наличии шумов используем численные методы.

По значению радиальной скорости определяем азимутальное смещение отметки от цели на РЛИ (боковой обзор) относительно отметки от стационарной цели

$$\Delta X = R V_r / V_{sg}, \quad (4.33)$$

где  $R$  – наклонная дальность цели;  $V_{sg}$  – путевая скорость (скорость в гринвичской системе координат).

При движении цели в сторону радиолокатора отметка от нее на РЛИ смещается против движения платформы, а поправка к азимутальной координате – положительна (см. рис. 9.7).

**Вычисление скорости цели на земной поверхности.** Для вычисления истинной скорости цели найдем связь между вектором скорости цели  $V_T$  на земной поверхности и его проекциями на направление визирования (радиальная составляющая  $V_r$ ) и на вектор путевой скорости КА (тангенциальная составляющая  $V_t$ ). Она определится ракурсом цели и углом падения (рис. 4.17)

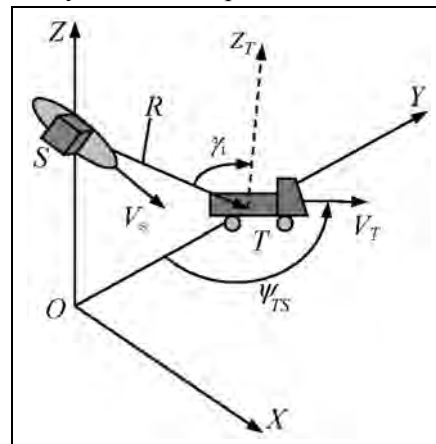
$$V_r = V_T \cos \psi_{TS} \sin \gamma_i, \quad (4.34)$$

где  $V_T$  – скорость ДЦ на поверхности Земли;  $\gamma_i$  – угол падения между вектором облучения  $R$  цели и местной вертикалью  $Z_T$  в точке нахождения цели;  $\psi_{TS}$  – угол между вектором скорости цели в плане и нормалью к трассе движения КА.

Тангенциальная составляющая скорости цели

$$V_t = V_T \sin \psi_{TS}. \quad (4.35)$$

Для вычисления истинной скорости цели по (4.25) при известной путевой скорости КА и угле падения нужно знать ракурс цели. В РСА высокого разрешения



**Рис. 4.17.** Геометрия наблюдения движущихся целей:  
 $V_s$  – скорость КА;  $V_T$  – скорость цели;  
 $\psi_{TS}$  – ракурс относительно нормали к линии пути ( $\psi_{TS} = 0$  при движении цели в сторону РЛС)

ракурс цели можно оценить по форме отметки от цели на РЛИ. Задача упрощается для крупногабаритных морских целей (см. раздел 9.3). Информативным признаком может быть направление дороги, но следует учитывать азимутальное смещение отметки ДЦ на РЛИ. Величина смещения азимутальной координаты при боковом обзоре равна

$$\Delta X_{Vr} = \frac{V_r R}{V_s} = \frac{R V_T \cos \psi_{TS} \sin \gamma_i}{V_s}. \quad (4.36)$$

При тематической обработке РЛИ с индикацией ДЦ их расчетное положение на РЛИ обычно отмечают специальными значками.

**Оценка погрешности оценивания скорости ДЦ.** Проведем приближенную оценку погрешности измерения радиальной скорости в предположении большого отношения сигнал/фон+шум. Воспользуемся соотношением для малых значений фазы

$$\varphi = \arg \{ \dot{U} \} = \arcsin \left( \frac{\text{Im}(\dot{U})}{|\dot{U}|} \right) \approx \frac{\text{Im}(\dot{U})}{|\dot{U}|}, \quad (4.37)$$

откуда с учетом (4.36) и (4.37) имеем

$$\begin{aligned} \Delta \varphi = \varphi_{Vr} - \langle \varphi_{Vr} \rangle &= \varphi_{Vr} - \frac{\text{Im} \left\{ (\dot{U}_{m_{A-1}} + \dot{u}_{nA}) \times (\dot{U}_{m_B}^* + \dot{u}_{nB}^*) \right\}}{\text{abs}(\dot{U}_{m_{A-1}} \times \dot{U}_{m_B}^*)} = \varphi_{Vr} - \\ &= \frac{\text{Im} \left\{ (\dot{U}_{m_{A-1}} + \dot{u}_{nA}) \times (\dot{U}_{m_B}^* + \dot{u}_{nB}^*) \right\}}{U_{m_{mt}}^2} = \text{Im} \{ \dot{u}' / U_{m_{mt}} \}, \end{aligned} \quad (4.38)$$

где  $\dot{u}' = \dot{u}_{nA} e^{j\phi_1} + \dot{u}_{nB} e^{j\phi_2}$  – сумма независимых случайных отсчетов шума в каналах  $A$  и  $B$ , умноженных на произвольные фазовые множители.

Среднеквадратическое отклонение фазовой ошибки равно

$$\text{СКО}(\Delta \varphi) = \sqrt{2/Q_{sn}},$$

где  $Q_{sn}$  – отношение сигнал/шум для ДЦ в суммарном канале.

Амплитуду ДЦ можно оценить по РЛИ в суммарном канале, учитывая, что ее координаты совпадают с РЛИ разностного канала. В точке, где обнаружена смещенная по азимуту отметка от ДЦ суммируются мощности сигналов от ДЦ, фона местности и шумов. Если цель компактная, то ее амплитуда на выходе синтеза суммарного канала может быть вычислена через разность квадратов амплитуд (мощностей) в точке цели и ближайших окрестностей

$$U_{\text{sum}_{mt}} = 2U_{m_{mt}} = \sqrt{U_{\text{sum}}^2 - U_{\text{fon+n}}^2}, \quad (4.39)$$

где  $U_{\text{fon+n}}$  – среднее значение процесса фон+шум в окрестности ДЦ.

СКО радиальной составляющей скорости определится выражением

$$\sigma_{Vr} \approx \frac{1,41\sigma_n}{K_x T_p U_{m_{mt}}} = \frac{\lambda}{1,41\pi T_p \sqrt{Q_{sn}}}. \quad (4.40)$$

#### Глава 4. Режимы работы космических РСА

На рис. 4.18 приведены зависимости для амплитуд суммарного и разностного сигналов от радиальной скорости при разных отношениях сигнал/шум для РСА X-диапазона волн с шестиметровой двухсекционной антенной. При увеличении длины волны или уменьшении горизонтального размера антенны пороговое значение измеряемой радиальной скорости возрастает. Имеется тенденция создания современной многоспутниковой информационной системы на базе малогабаритных РСА с решением задачи индикации движущихся целей путем использования бистатических комплексов – тандемов РСА (Radarsat-2/3, TanDEM-X на базе TerraSAR-X) с близкими орбитами и смещением КА вдоль и поперек (для построения карт рельефа) линии пути.

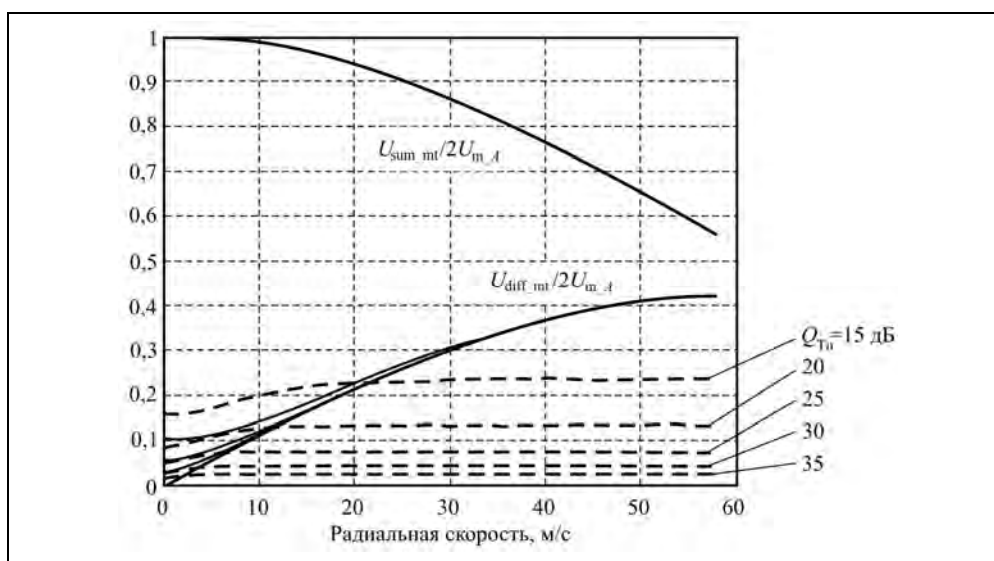


Рис. 4.18. Зависимости амплитуд суммарного и разностного сигналов от радиальной скорости. Пунктиром показаны СКО шума в разностном канале при разных отношениях сигнал/шум  $Q_{sn}$

**Метод пространственно-частотной фильтрации сигналов для индикации движущихся целей.** Альтернативой к продольной интерферометрии, но применительно к РСА с зеркальными антеннами может быть использован метод пространственно-частотной фильтрации (ПЧФ) сигнала, создающий виртуальное смещение фазового центра излучения, не меняя формы ДНА [37\*, 161\*, 428\*]. В антенне формируют три частично перекрывающиеся луча в азимутальной плоскости. Центральный луч, направленный по нормали к вектору путевой скорости, используют для излучения сигналов. Боковые лучи, направленные вперед  $A$  и назад  $B$ , используют для приема сигналов и их усиления в двух независимых приемниках, на выходе которых стоят аналого-цифровые преобразователи.

В процессе синтеза РЛИ азимутальные спектры сигналов, принятые в каждом из каналов  $A$  и  $B$  умножаются на весовые функции, соответствующие другому кана-



лу  $B$  и  $A$ . При этом спектр доплеровских частот сигнала  $S_1$  умножается на взвешивающую функцию  $K_d$ , совпадающую с огибающей спектра сигнала  $S_2$  и наоборот. В результате спектры сигналов обоих каналов для неподвижных целей и фона местности совпадают. Полученные после обратного преобразования Фурье радиолокационные изображения подстилающей поверхности после детектирования для неподвижных целей оказываются идентичными и при вычитании они компенсируются. Для движущихся целей огибающие входных спектров смещаются, что при их вычитании дает разность РЛИ, отличную от нуля и пропорциональную скорости цели.

Метод ПЧФ, помимо преимуществ использования в РСА с зеркальными антеннами, обеспечивает меньшие значения СКО оценки радиальной скорости, чем продольная интерферометрия, для случаев небольшого отношения ЭПР цели к ЭПР элемента фона (менее 15 дБ), но при больших отношениях сигнал/шум  $\sim 35$  дБ.

**Индикация движущихся целей по тангенциальной составляющей скорости движения.** В РСА высокого разрешения возможна индикация и измерение скорости целей не только по радиальной составляющей, но и по тангенциальной составляющей, вызывающей расфокусировку изображения ДЦ, а также за счет обнаружения смещения отметок от целей за время наблюдения. Эти методы, как правило, не требуют введения специальных режимов работы космических РСА, а относятся к алгоритмам обработки радиолограмм или получаемых комплексных РЛИ. Поэтому они рассматриваются в гл. 6.

Рассмотренные режимы космических РСА (кроме широкозахватных режимов с высоким разрешением и метода пространственно-частотной фильтрации движущихся целей), как правило, реализуются в современных РСА. Это обеспечивает многофункциональность РСА с гибкой адаптацией параметров аппаратуры для решения широкого круга задач двойного применения.

---

## Глава 5

# РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА ПРИ КОСМИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ОБЗОРЕ

### 5.1. Состав параметров траекторного сигнала

Под *траекторным сигналом* в РСА будем понимать сигнал, принятый от одиночной точечной цели в процессе движения платформы с РСА в течение времени, достаточном для получения радиолокационного изображения. Это «медленное время»  $t_x$ , характеризующее движение радиолокатора вдоль траектории полета, будем в данной главе обозначать символом  $t$  без индекса (см. раздел 3.2). Траекторный сигнал является аналогом амплитудно-фазового распределения поля по раскрытию физической антенны (конформной антенной решетки произвольного профиля). Он определяет форму диаграммы направленности синтезированной антенны (импульсного отклика РСА) вдоль траектории полета, получаемой в результате согласованной фильтрации сигнала.

В состав параметров траекторного сигнала, знание которых необходимо для выбора технических параметров РСА, реализации алгоритмов синтеза радиолокационного изображения (РЛИ) и оценки разрешающей способности РСА вдоль линии пути (по азимуту), входят:

1) временные зависимости наклонной дальности цели  $R(t)$ , а также фазы  $\varphi(t)=4\pi R(t)/\lambda$ , однозначно определяемой наклонной дальностью при выбранной длине волны РСА  $\lambda$ ;

2) временная зависимость доплеровской частоты (производной фазы по времени)  $F_{\text{Доп}}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}$ , с учетом которой выбирают частоту повторения зондирующих сигналов РСА для исключения помех неоднозначности;

3) временная зависимость амплитуды принятого сигнала от точечной цели  $U(t)$ ;

4) длительность траекторного сигнала, определяющая максимальное время синтеза  $T_{\text{синт}}$  РЛИ или время обработки, сочетающей когерентное и некогерентное накопление;

5) геометрические размеры синтезированной апертуры в пространстве  $L_a$ , используемые при антенном подходе к анализу процессов синтеза РЛИ и оценке реализуемого разрешения по азимуту;

6) ширина спектра доплеровских частот  $\Delta F_{\text{Доп}}$ , ограниченная шириной луча антенны РСА по азимуту и определяющая выбор частоты повторения зондирующего сигнала;

7) разрешение РСА по азимуту  $\rho_x$ .

В перечисленном списке параметров траекторного сигнала, часть из них (фаза, доплеровская частота) зависят не только от параметров движения платформы, но и от рабочей длины волны РСА. Приведенные в данной главе расчетные формулы характеризуют кинематику движения, не привязанную к значениям длины волны конкретного РСА. Предполагается, что временная зависимость фазы сигнала  $\varphi(t)$  однозначно определена временной зависимостью наклонной дальности цели  $R(t)$  через длину волны РСА  $\lambda$ , т.е.  $\varphi(t) = 4\pi R(t)/\lambda$ , а зависимость доплеровской частоты сигнала  $F_{\text{Доп}}(t)$  – радиальной скоростью цели  $V_r(t)$ :  $F_{\text{Доп}}(t) = 2V_r(t)/\lambda$ . В дальнейшем тексте при описании параметров сигнала возможно объединение этих понятий.

Примеры вычисления перечисленных параметров даны в гл. 3 при объяснении принципов работы РСА для простейшего случая прямолинейного равномерного движения платформы с РСА. На практике для самолетных РСА рассматривают также случаи синтеза РЛИ при полете с ускорением, криволинейном полете, а также при круговой траектории полета [353].

Работа РСА в составе космического аппарата связана с необходимостью учета ряда специфических факторов, к которым относятся:

- 1) кривизна земной поверхности;
- 2) вращение Земли и ошибки ориентации осей КА, вызывающие смещение доплеровского спектра и увеличенную миграцию дальности;
- 3) большая дальность наблюдения, предъявляющая высокие требования к энергетическому потенциалу РСА и точности фокусирования синтезированной апертуры;
- 4) высокая орбитальная скорость КА, что приводит к существенной неопределенности зондирующего сигнала по азимуту или дальности;
- 5) возмущения от кеплеровского закона движения КА и ошибки ориентации строительных осей КА относительно осей координат радиолокационного обзора;
- 6) деструктивные воздействия на трассе распространения сигнала (тропосферные и ионосферные нестабильности).

Создание и эксплуатация космических РСА разделяется на несколько стадий, в которых анализ воздействия перечисленных факторов имеет различия и разные требования к точности знания параметров относительного движения. На стадии проектирования РСА для выбора требований к параметрам РСА и обеспечивающих систем можно ограничиться простой моделью Кеплера движения спутника. Очень высокая точность позиционирования КА при съемке требуется для «нацеливания» антенны радиолокатора на заданный участок местности, особенно для интерферометрической обработки, построения высокоточных карт рельефа местности, вычисления опорной функции для синтеза РЛИ высокого разрешения и привязки РЛИ к географическим координатам с точностью до одного пикселя (отсчета) РЛИ.

Преобразование первичной информации в координатах наклонная дальность – время излучения зондирующего импульса в картографические координаты поперек и вдоль трассы движения КА требуют тщательного учета доплеровского смещения принимаемого сигнала, рельефа местности и параметров относительного движения.

Для нацеливания радиолокатора на объект съемки необходимы измерение текущих координат КА, ориентация осей КА в пространстве обзора, а также управление параметрами радиолокатора (частотой повторения, положением временных стробов приема) и управление диаграммой антенны по углу места и азимуту. Необходимые управляющие параметры вводятся на основании баллистических расчетов движения КА, данных текущих траекторных измерений, параметров модели геоида.

## 5.2. Системы координат, используемые при радиолокационном обзоре

Для описания соотношений, определяющих положения КА и точки наблюдения, геометрию получаемого радиолокационного снимка, параметры принимаемого сигнала (фазу, доплеровскую частоту), используют различные системы координат – полярные (угловые) и прямоугольные (декартовы). К ним относятся (рис. 5.1) [95, 160\*, 169, 221, 233]:

1) геоцентрическая гринвичская система координат (ГСК)  $OX_G Y_G Z_G$ , учитывающая вращение Земли, в которой ось  $OZ_G$  направлена на север, ось  $OX_G$  – в сторону нулевого меридиана, а ось  $OY_G$  дополняет ГСК до правой тройки;

2) геоцентрическая инерциальная экваториальная система координат  $OX_\gamma Y_\gamma Z_\gamma$ , в которой ось  $OZ_\gamma$  направлена на север, ось  $OX_\gamma$  – в точку весеннего равноденствия, а ось  $OY_\gamma$  дополняет систему до правой тройки;

3) введенная для удобства рассмотрения «опорная» система координат  $OX_N Y_N Z_N$ , образованная поворотом системы  $OX_\gamma Y_\gamma Z_\gamma$  вокруг оси  $OZ_\gamma$  таким образом, чтобы ее ось  $OX_N$  была направлена в восходящий узел орбиты КА;

4) орбитальная система координат (ОСК)  $OX_o Y_o Z_o$  с осью  $OZ_o$  в плоскости орбиты, образованная поворотом системы  $OX_N Y_N Z_N$  вокруг оси  $OX_N$ ;

5) полярная географическая система координат, характеризуемая широтой  $\varphi$  и долготой  $\lambda$  (по Гринвичу), а также локальным радиусом Земли  $R_e$  или текущим радиусом орбиты КА  $R_s$  (на рис. 5.1 не показана);

6) подвижная, связанная с КА геоцентрическая система  $OX_s Y_s Z_s$ , в которой ось  $OZ_s$  направлена в зенит, ось  $OX_s$  параллельна вектору орбитальной скорости, а ось  $OY_s$  дополняет систему до правой (на рис. 5.1 не показана);

7) подвижная, связанная с КА опорная система координат  $SXYZ$  с началом в центре масс КА и осями, параллельными осям  $OX_s Y_s Z_s$ , но обозначения которых заменены. Ось  $SX$  направлена вдоль продольной оси КА, ось  $SY$  – в зенит, а ось  $SZ$  вбок, дополняя систему до правой. Систему координат с таким направлением осей обычно используют в литературе по управлению космическими аппаратами;

8) подвижная, связанная система координатных осей КА  $SX_p Y_p Z_p$ , начало которой находится в центре масс КА. Ось  $SX_p$  направлена вдоль продольной оси КА, ось  $SY_p$  – вверх, а ось  $SZ_p$  вбок, дополняя систему до правой. Связанные с КА системы на рис. 5.1 не показаны. Они рассматриваются в следующих разделах этой главы.

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

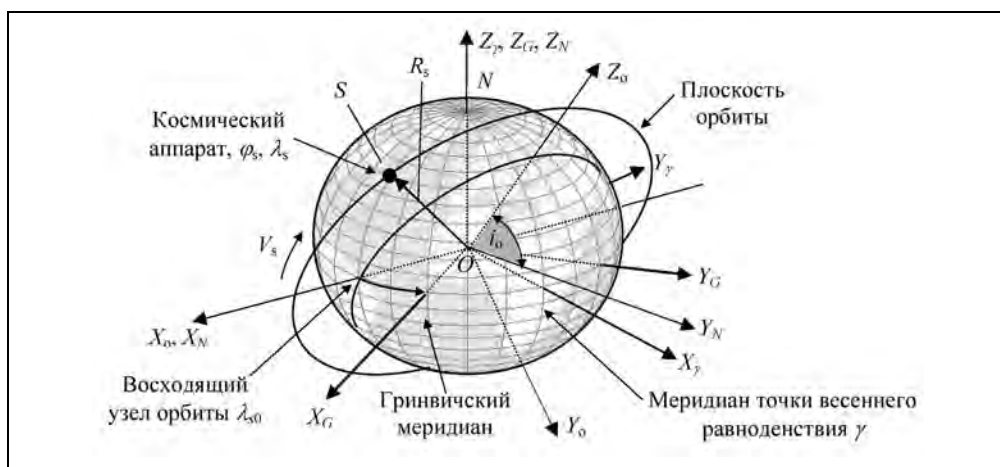


Рис. 5.1. Геоцентрические системы координат

В дальнейшем изложении геоцентрические координаты используются для описания движения центра масс платформы с РСА, расчета наклонной дальности наблюдения и ее временной зависимости. Связанные с КА подвижные системы координат требуются для описания углов ориентации платформы и углов нацеливания луча антенны на заданный район радиолокационной съемки, расчета амплитуды принимаемого сигнала, отраженного от земной поверхности и объектов.

К *полярной системе координат* относится географическая система координат с началом в центре Земли (геоцентрическая система), определяющая точку на земной поверхности через широту  $\varphi$  относительно плоскости экватора (базовая плоскость) и долготу  $\lambda$  относительно нулевого (гринвичского) меридиана. Расстояние точки от центра (длина радиус-вектора) определяется радиусом Земли  $R_e$  на широте  $\varphi$ . В географических координатах может задаваться положение центра масс КА координатами подспутниковой точки  $\varphi_s, \lambda_s$  и текущим радиусом орбиты  $R_s$ .

Показанная на рис. 5.1 опорная геоцентрическая система координат  $OX_N Y_N Z_N$  является аналогом инерциальной системы. Она повернута таким образом, чтобы ее ось  $OX_N$  лежала в плоскости орбиты (совпадала с осью  $OX_o$ ). Это позволяет упростить формулы при рассмотрении геометрии радиолокационного обзора.

Положение спутника задают шестимерным вектором координат  $\mathbf{R}_s(t)$  и скоростей  $\mathbf{V}_s(t)$  либо элементами орбиты:  $a_o$  – большой полуосью орбиты;  $b_o$  – малой полуосью орбиты;  $e_o$  – эксцентриситетом;  $i_o$  – наклонением орбиты;  $\theta_{op}$  – аргументом перигея;  $\lambda_{s0}$  – долготой восходящего узла;  $\theta_s$  – аргументом широты и угловой скоростью орбитального движения  $\omega_s$ .

Форму Земли – *геоид* – принято описывать эллипсоидом вращения – *референц-эллипсоид*. Используемая фигура референц-эллипсоида наилучшим образом подходит для территории отдельной страны или нескольких стран для выполнения определенных работ. В СССР с 1946 г. для геодезических работ использовали эллипсоид Красовского.

## Глава 5. Расчет параметров траекторного сигнала ...

В настоящее время используют следующие *референц-эллипсоиды* [219, 460, 532/Фигура Земли, 546]:

- GRS80 (Geodetic Reference System 1980), разработанный Международной Ассоциацией Геодезии и Геофизики (International Union of Geodesy and Geophysics). Рекомендуется для геодезических работ;
- WGS84 (World Geodetic System 1984) применяется в системе спутниковой навигации GPS (США);
- ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 года) используется на территории России для геодезического обеспечения орбитальных полетов. Этот эллипсоид применяется в системе спутниковой навигации ГЛОНАСС.

К параметрам референц-эллипсоидов относятся:

- 1)  $a_e$  – большая полуось (экваториальный радиус) эллипсоида;
- 2)  $b_e$  – малая полуось (полярный радиус);
- 3)  $f = (a_e - b_e)/a_e$  – геометрическое (полярное) сжатие;

$$4) e_e = \sqrt{(a_e^2 - b_e^2)/a_e^2} = \sqrt{1 - (1 - f)^2} = 0,08181911 \text{ (ПЗ-90)}, \quad e'_e = \sqrt{(a_e^2 - b_e^2)/b_e^2} -$$

первый и второй эксцентриситеты эллипсоида;

5)  $\mu_0$  – гравитационная постоянная Земли (произведение универсальной гравитационной постоянной и массы Земли);

6)  $J_n$  – безразмерные постоянные, характеризующие форму и гравитационное поле Земли;

7)  $\omega_e$  – угловая скорость вращения Земли.

Основные параметры референц-эллипсоидов и связанных с ними систем земных координат приведены в табл. 5.1.

**Таблица 5.1. Параметры Земли**

Тип референц-эллипсоида	Параметры Земли				
	$a_e$ , км	$1/f$	$\mu_0 \times 10^{14}$ , м <sup>3</sup> с <sup>-2</sup>	$J_2$	$\omega_e \times 10^{-5}$ , рад/с
GRS80	6378,137	298,257222101	3,986005	1,08263	7,292115
WGS84	6378,137	298,257223563	3,986004418	1,08263	7,292115
ПЗ-90	6378,136	298,257839303	3,9860044	1,0826257	7,292115

В нулевом приближении Землю можно считать шаром со средним радиусом  $R_{e\_mean} = 6371,004 \approx 6371$  км [533], что соответствует географической широте  $34,5^\circ$ . Для более точных практических расчетов относительного движения (радиолокатора относительно точки наблюдения на земной поверхности) можно использовать сферическую модель Земли с локальным радиус-вектором  $R_e$  на широте  $\varphi$ , вычисляемым по формуле

$$R_e = \frac{a_e \sqrt{1 - e_e^2}}{\sqrt{1 - e_e^2 \cos^2 \varphi}}, \quad (5.1)$$

где  $\varphi$  – астрономическая широта точки наблюдения. Она практически совпадает с географической широтой.

Особенность радиолокационной съемки и ее преимущество в сравнении с фотографической съемкой заключается в возможности измерений расстояний между объектами с точностью до долей длины волны. Для реализации этой возможности требуется знание формы геоида, характеристик рельефа местности, точных параметров движения платформы с РСА.

Расчет параметров траекторного сигнала для модели прямолинейного движения платформы приведен в разделе 5.3, а для орбитального движения – в разделах 5.4–5.6.

### **5.3. Временные зависимости фазы и амплитуды принимаемого сигнала в РСА**

Синтез радиолокационного изображения основан на согласованной фильтрации принятого сигнала с применением опорной функции, точно компенсирующей закон распределения фазы сигнала, записанного в процессе движения РСА по траектории полета. Формирование опорных функций при цифровом синтезе РЛИ требует значительных вычислительных ресурсов, для снижения которых используют аналитическое описание временных зависимостей параметров принимаемых сигналов (радиоголограммы) с использованием разных аппроксимирующих моделей. В данном разделе рассмотрена модель прямолинейного движения платформы и приведены соотношения для расчета основных параметров принимаемого сигнала вдоль траектории полета: зависимостей амплитуды и фазы, времени синтеза и размеров синтезированной апертуры для реализации заданного азимутального разрешения.

При *синтезе радиолокационного изображения по записанным радиоголограммам* в общем случае должны учитываться:

- 1) временная зависимость наклонной дальности до цели, характеризующая закон изменения фазы сигнала и опорную функцию для синтеза изображения;
- 2) радиальная скорость цели, характеризующая положение доплеровского центроида;
- 3) временная зависимость амплитуды сигнала, определяющая размеры синтезированной апертуры, реализующей разрешающую способность, и оказывающая влияние на форму весовой функции обработки и форму отклика.

При *анализе алгоритмов синтеза апертуры* обычно используют упрощенные модели движения радиолокатора относительно точки наблюдения. Для самолетных РСА это модель прямолинейного равномерного движения радиолокатора. Она позволяет проводить расчет параметров РСА и основных составляющих опорной функции для синтеза, к которым добавляются составляющие для коррекции траекторных и других нестабильностей.

Для космических РСА закон относительного движения значительно сложнее. Реальная временная зависимость дальности определяется параметрами возмущенного движения спутника в гравитационном поле Земли, геометрией обзора, кривизной земной поверхности, вращением Земли и другими факторами. Тем не ме-

нее, идея использования упрощенной модели движения платформы с прямолинейным равномерным движением остается актуальной и в этом случае.

В ряде работ [347, 348] используют разложение временной зависимости дальности в ряд Тейлора, коэффициенты которого должны вычисляться по эфемеридам спутника. Однако такой подход громоздок, усложняет анализ временных зависимостей фазы и углов наблюдения при вариации наклонной дальности съемки, особенно для режимов прожекторного и скошенного обзора.

Более продуктивно для расчета космических РСА использовать модель относительного движения РСА и цели, адаптированную к условиям радиолокационного обзора [159\*, 430\*]. Она заменяет истинное движение в окрестности точки съемки невозмущенным Кеплеровым движением. Земля представляется сферой с радиусом, равным радиусу земного эллипсоида на широте спутника (или широте района съемки – для высокоорбитальных РСА). Приведенная аппроксимация криволинейного орбитального движения эквивалентной моделью прямолинейного движения значительно облегчает расчет опорных функций для синтеза изображения.

В настоящем разделе рассмотрены особенности, связанные с орбитальным движением РСА и проведено сравнение со случаем прямолинейного движения на примере упрощенной модели круговой орбиты. В разделе 5.5 анализируется общий случай Кеплеровой орбиты, а в разделе 5.6 приведена модель движения, адаптированная к радиолокационному обзору, и особенности ее применения для учета возмущенного движения КА.

Проводя аналогию орбитального обзора с обзором в самолетных РСА при прямолинейном полете, следует рассматривать три составляющие скорости платформы: воздушную скорость (аналог орбитальной скорости спутника), ветровой снос (аналог вращения Земли) и вертикальную скорость (изменение высоты орбиты из-за эллиптичности орбиты и возмущающих воздействий). Геометрия самолетного обзора показана на рис. 5.2, где ось  $X$  – направлена вдоль вектора горизонтальной путевой скорости  $V_{sg}$ , которая является векторной суммой воздушной скорости и скорости ветра.

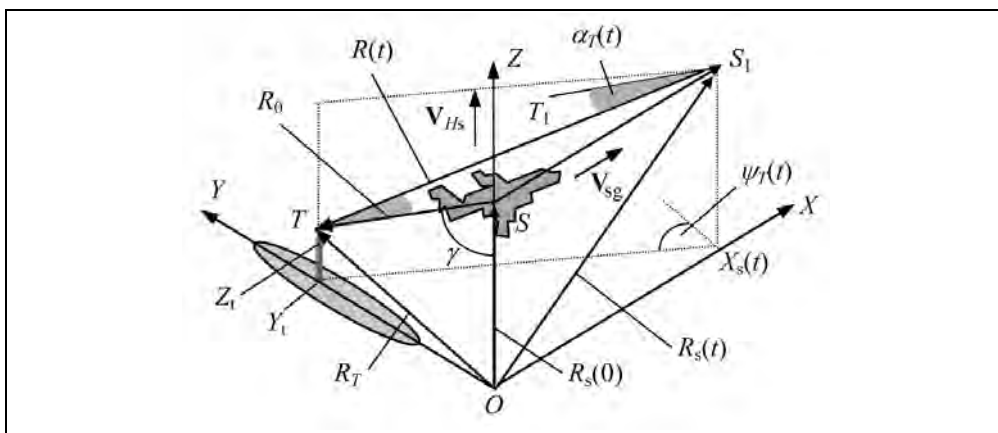


Рис. 5.2. Геометрия обзора при прямолинейном движении платформы



В декартовой системе координат  $OXYZ$  вектор наклонной дальности  $R(t)$  равен разности векторов цели и фазового центра антенны

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_T - \mathbf{R}_s(t), \quad (5.2)$$

где  $\mathbf{R}_T = x \cdot X_T + y \cdot Y_T + z \cdot Z_T$  – координаты цели;  $\mathbf{R}_s(t)$  – текущие координаты фазового центра антенны (близкие к центру масс КА);  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$  – единичные орты по осям.

Примем, что при  $t=0$  облучается цель  $T$  в плоскости  $OST$ , перпендикулярной вектору горизонтальной скорости  $\mathbf{V}_{sg}$ , при этом  $X_s=0, X_T(0)=0$ . Текущее положение носителя определяется вектором  $\mathbf{R}_s(t)$  с началом в начале координат  $O$

$$\mathbf{R}_s(t) = \mathbf{x}V_{sg}t + \mathbf{y}0 + \mathbf{z}(Z_s + V_{Hs}t). \quad (5.3)$$

Временной закон изменения дальности цели можно представить разложением в ряд Тейлора по степеням  $t$ :

$$\begin{aligned} R(t) &= \sqrt{V_{sg}^2 t^2 + Y_T^2 + (Z_s + V_{Hs}t - Z_T)^2} = \sqrt{R_0^2 + V_{sg}^2 t^2 + 2(H_s - Z_T)V_{Hs}t} \approx \\ &\approx R_0 + \sum_{n=1}^N C_n t^n + \dots, \end{aligned} \quad (5.4)$$

где  $R_0 = R(0) = \sqrt{Y_T^2 + (Z_s - Z_T)^2}$  – начальная наклонная дальность при  $t=0$ ;  $N$  – число членов, зависящее от требуемой точности вычислений.

При прямолинейном горизонтальном полете ( $V_{Hs}=0$ ) для всех целей в плоскости визирования  $SOY$ , проходящей через вертикаль в точке следа и перпендикулярной траектории следа на поверхности Земли, радиальная скорость и соответственно доплеровская частота принятого сигнала равны нулю – цели находятся в точках «ближайшей дальности» для всех наклонных дальностей целей независимо от их удаления от трассы даже при наличии рельефа или кривизны Земли.

Если вертикальная скорость отлична от нуля  $V_{Hs} \neq 0$ , то при  $t=0$  начальная дальность  $R_0$  цели, находящейся в плоскости, нормальной к следу, не совпадает с ее «ближайшей дальностью», для которой  $\dot{R}(t_{nr}) = 0$ . Так, например, при полете с набором высоты, вызываемая ею радиальная скорость отрицательна (создается отрицательное доплеровское смещение частоты) и для ее компенсации требуется поворот плоскости визирования вперед по тангажу на угол

$$\mathcal{Q}_{Vh} = \arctg(V_{Hs}/V_{sg}). \quad (5.5)$$

Соответствующие поправки требуются для вычисления минимальной дальности цели, времени прохождения нулевой доплеровской частоты и азимутальной координаты цели. Для плоской Земли угловая азимутальная поправка не зависит от наклонной дальности, но изменяется пропорционально изменению текущей высоты носителя  $Z_s(t)$ .

Временная зависимость фазы связана с изменением наклонной дальности

$$\phi_T(t) = -2K_x R(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} R(t), \quad (5.6)$$

где  $K_x = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

Временная зависимость амплитуды принимаемого сигнала определится формой диаграммы направленности антенны  $G(\alpha_T, \gamma)$  по азимуту  $\alpha_T$  и углу места  $\gamma$ . Для типичных условий  $V_{Hs} \ll V_{sg}$ . Это позволяет при оценке углов пренебречь вертикальной скоростью и отклонением линии  $S_1S_2$  от горизонтали на рис. 5.3. Принимаемый сигнал от цели имеет вид

$$u_r(t) = AG(\alpha_T(t), \gamma - \gamma_{a0}) e^{j(2\pi f_0 t - 2K_x R(t))}, \quad (5.7)$$

где  $A$  – коэффициент, определяемый энергетическими параметрами РСА;  $f_0$  – частота сигнала РСА;  $\gamma_{a0}$  – угол места установки луча антенны;  $\alpha_T$  – угол визирования по азимуту, который для прямолинейного движения со скоростью  $V_s$  в маршрутном режиме равен

$$\alpha(t) = \arctg(V_{sg}t/R_0). \quad (5.8)$$

Применим модель прямолинейного движения платформы с РСА к приведенной на рис. 5.3, а геометрии космического обзора для двух целей  $T_1$  и  $T_2$ , смещенных по азимуту. Такая модель применима для расчета основных параметров низковысотных (до ~1000 км) РСА. Рассмотрим геоцентрическую систему координат, в которой в момент  $t=0$  ось  $Z$  проходит через фазовый центр антенны РСА и направлена в зенит. Ось  $X$  параллельна вектору путевой скорости спутника  $V_{sg}$  относительно поверхности Земли (вектор скорости в гринвичской системе координат). Ось  $Y$  дополняет систему до правой.

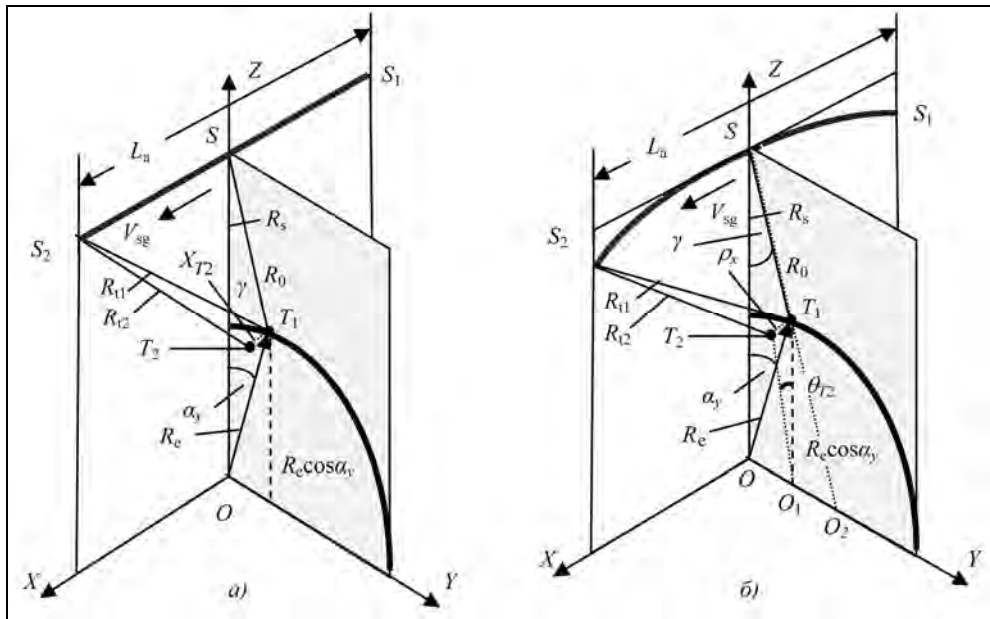


Рис. 5.3. Геометрия космического обзора при прямолинейной модели движения платформы (а) и при движении по круговой орбите (б):

$R_s$  – радиус орбиты КА;  $R_e$  – локальный радиус Земли;  $R_{11}, R_{12}$  – текущие дальности целей  $T_1, T_2$ ;  
 $X$  – смещение по азимуту

Векторы положения целей  $\mathbf{T}_1$ ,  $\mathbf{T}_2$  и модели движения спутника  $\mathbf{S}(t)$ , а также значение минимальной дальности  $R_0$  представлены выражениями (5.9)–(5.12)

$$\mathbf{T}_1 = \{0, R_e \sin \alpha_y, R_e \cos \alpha_y\}, \quad (5.9)$$

$$\mathbf{T}_2 = \{X_{T2}, R_e \sin \alpha_y, R_e \cos \alpha_y\}, \quad (5.10)$$

$$\mathbf{S}(t) = \{V_{sg}t, 0, R_s\}, \quad (5.11)$$

$$R_0 = \sqrt{(R_e \sin \alpha_y)^2 + (R_s - R_e \cos \alpha_y)^2} = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos \alpha_y}. \quad (5.12)$$

Запишем выражения для временных зависимостей наклонной дальности, фазы и доплеровской частоты сигнала, принятого от цели  $T_2$ . Они понадобятся в дальнейшем для сравнения с другими моделями движения платформы с РСА. Временная зависимость наклонной дальности до цели  $R_{T2}$ , представленная первыми членами разложения в степенной ряд, имеет вид

$$R_{T2}(t) = \sqrt{R_0^2 + (V_{sg}t - X_{T2})^2} \approx R_0 + \frac{V_{sg}^2 t^2 - 2V_{sg} X_{T2} t + X_{T2}^2}{2R_0} + \dots \quad (5.13)$$

Временная зависимость фазы определяется уравнением (5.6)

$$\varphi_{T2}(t) = -\frac{4\pi R_{T2}}{\lambda} \approx -\frac{4\pi R_0}{\lambda} - 4\pi \frac{V_{sg}^2 t^2 - 2V_{sg} X_{T2} t + X_{T2}^2}{2R_0 \lambda} + \dots \quad (5.14)$$

Для временной зависимости доплеровской частоты сигнала от цели  $T_2$  имеем близкий к ЛЧМ процесс

$$F_{DopT2}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi_{T2}(t) \approx \frac{2V_{sg} X_{T2}}{R_0 \lambda} - \frac{2V_{sg}^2}{R_0 \lambda} t \dots \quad (5.15)$$

Временная зависимость амплитуды принимаемого сигнала от цели  $T_2$  определяется формой азимутальной ДНА:

$$U(t) = U_{\max} G_{xant} \left( \arcsin \frac{V_{sg} t}{R_0} \right), \quad (5.16)$$

где  $U_{\max}$  – амплитуда сигнала в максимуме ДНА;  $G_{xant}(\alpha)$  – форма азимутальной ДНА (по мощности);  $V_{sg}$  – путевая скорость платформы.

Для оценки разрешения РСА по азимуту найдем разность фаз сигналов на краях синтезированной апертуры ( $t = \pm T_{synt}/2$ ), принятых от разнесенных по азимуту точек  $T_1$  и  $T_2$  на поверхности Земли (рис. 5.3, а). Фазовый набег по апертуре синтезированной антенны при наблюдении цели  $T_1$  по нормали к апертуре равен нулю. Фазовый набег по апертуре синтезированной антенны при наблюдении цели  $T_2$ , смещенной по азимуту на  $X_{T2}$ , определяется формулой

$$\Delta \varphi_{T2} = \left| \varphi_{T2} \left( \frac{T_{synt}}{2} \right) - \varphi_{T2} \left( -\frac{T_{synt}}{2} \right) \right| \approx \frac{4\pi X_{T2} V_{sg} T_{synt}}{R_0 \lambda} = \frac{4\pi L_a X_{T2}}{R_0 \lambda}. \quad (5.17)$$

Разрешающую способность РСА по азимуту находят из величины набега фазы на синтезированной апертуре, равной  $\Delta\varphi_{T2}(X_{T2})=2\pi$ , откуда получаем известное соотношение для разрешения по азимуту:

$$\rho_X = X_{T2} \Big|_{\Delta\varphi_{T2}=2\pi} = \frac{R_0\lambda}{2L_a}, \quad (5.18)$$

где  $L_a = V_{sg} T_{\text{synt}}$  – длина синтезированной апертуры.

Анализ рассмотренной модели прямолинейного движения платформы с РСА показывает, что применительно к расчету основных параметров синтеза РЛИ – длины синтезированной апертуры, времени синтеза и азимутального разрешения она совпадает с типичным случаем самолетных РСА, имеющих значительно меньшую наклонную дальность съемки. Отличия состоят в том, что аппроксимация временной зависимости наклонной дальности степенным рядом (5.13) до члена второй степени (включительно) неприемлема для космических РСА из-за больших фазовых ошибок. Для реализации разрешающей способности в единицы метров в  $S$ - или  $L$ -диапазонах волн на дальностях до 1000 км в предположении прямолинейной модели движения необходимо точное вычисление квадратного корня либо его представление членами ряда до 10-й степени (погрешности расчета фазы не должны превышать единиц градусов). Рассмотренная модель не учитывает реального движения платформы по криволинейной траектории, например, круговой орбиты (рис. 5.3, б). Анализ параметров сигнала при движении платформы по круговой орбите проведен в следующем разделе. При этом показано, что в расчетах параметров принимаемого сигнала при криволинейном движении можно применить рассмотренную выше модель прямолинейного движения, но с измененным (эквивалентным) значением путевой скорости платформы и другими уточнениями.

#### 5.4. Расчет параметров траекторного сигнала при движении платформы по круговой орбите

В данном подразделе рассмотрены принципиальные отличия параметров принимаемого сигнала при работе РСА на криволинейной (круговой) траектории. Связанные с этим явления особенно заметны для высокоорбитальных РСА, например, для РСА на геосинхронной орбите [439] или для самолетного РСА с круговой траекторией полета [353], в которой объект наблюдения находится в центре окружности – траектории РСА. Фаза принимаемого от такого объекта сигнала постоянна и получаемое РЛИ в окрестностях этого объекта имеет ряд особенностей.

Для расчета технических параметров в ходе проектирования космических РСА с учетом явлений, обусловленных кривизной траектории движения платформы, целесообразно использовать общепринятые методики, применяемые для случая прямолинейного равномерного движения. Это оказывается возможным для круговой траектории, если сектор, образованный апертурой синтеза, не превышает четверти окружности. Задача решается введением в расчеты корректирующих коэффициентов в исходные данные.

Геометрия космического обзора для движения платформы по круговой орбите приведена на рис. 5.3, б. Для простоты данного рассмотрения, в отличие от приведенного в разделе 5.6, формула (5.69), влияние вращения Земли учтем только поправкой от тангенциальной составляющей, зависящей от угла наклона орбиты. Временная зависимость положения платформы при круговой орбите движения спутника определится выражением

$$\mathbf{S}(t) = \left\{ R_s \sin(\omega_{sg}t), 0, R_s \cos(\omega_{sg}t) \right\}; \quad (5.19)$$

$$\omega_{sg} \approx \omega_o - \omega_e \cos i_o,$$

где  $\omega_{sg}$  – угловая путевая (в гринвичской системе координат) скорость спутника;  $\omega_o$  – угловая орбитальная скорость;  $\omega_e$  – угловая скорость вращения Земли;  $i_o$  – угол наклона орбиты КА.

При этом для цели  $T_2$  на рис. 5.3, б имеем временную зависимость наклонной дальности  $R_{T_2}(t)$ , представленную в виде квадратного корня, а также первыми членами его разложения в степенной ряд:

$$\begin{aligned} R_{T_2}(t) &= \sqrt{\left( R_s \sin \omega_{sg}t - X_{T_2} \right)^2 + R_e^2 \sin^2 \alpha_y + \left( R_s \cos \omega_{sg}t - R_e \cos \alpha_y \right)^2} \approx \\ &\approx R_0 + \frac{R_s R_e \cos \alpha_y \sin^2(\omega_{sg}t) - 2R_s X_{T_2} \sin \omega_{sg}t + X_{T_2}^2}{2R_0} + \dots \end{aligned} \quad (5.20)$$

или

$$R_{T_2}(t) \approx R_0 + \frac{R_s R_e \cos \alpha_y \sin^2(\omega_{sg}t - \theta_{T_2})}{2R_0} + \dots,$$

где смещение по азимуту выражено через центральный угол сегмента  $T_1 O_1 T_2$

$$\theta_{T_2} = \arcsin\left( \frac{X_{T_2}}{R_e \cos \alpha_y} \right). \quad (5.21)$$

Для цели  $T_1$  справедливы выражения (5.20) и (5.21) с подстановкой в них  $X_{T_2}=0$  и  $\theta_{T_2}=0$ .

Рассмотрим наиболее распространенный случай маршрутного режима работы РСА и определим реализуемое время синтеза, ширину спектра сигнала и разрешение по азимуту для орбитального движения КА. Будем считать заданными азимутальную форму диаграммы направленности антенны (ДНА) по мощности  $G_x(\alpha_x)$  и ширину ДНА по заданному уровню мощности  $\alpha_{ant}$ . Заметим, что амплитуда принятого сигнала пропорциональна КУ антенны в направлении на цель, поскольку форма ДНА по полю учитывается на передачу и прием. Для прямолинейного движения платформы соотношения между указанными параметрами хорошо известны. Максимальная длина синтезированной апертуры

$$L_{a \max} = \frac{R_0 \lambda}{D_{xant}}, \quad (5.22)$$

максимальное время синтеза



Поскольку при расчете разрешающей способности и длины апертуры синтеза особой точности не требуется (допустима погрешность до ~5 %), можно пренебречь высотой дуги  $P_1P_2$ , и принять высоты треугольников равными

$$h_{P_1P_2S} \approx R_0; h_{P_1P_2O_1} \approx R_e \cos \alpha_y. \quad (5.27)$$

где  $\alpha_y$  – центральный угол цели на поверхности Земли, показанный на рис. 5.3.

При этом основание треугольников – хорда  $P_1P_2$  – определит область облучения местности антенной и угловое положение КА на краю области облучения цели  $T_1$

$$\Delta\theta_s \approx \arctg \frac{R_0\lambda}{R_e \cos \alpha_y D_{xant}}. \quad (5.28)$$

Максимальная длина синтезированной антенны и время синтеза в маршрутном режиме будут превышать рассчитанные для прямолинейной модели движения значения, пропорционально масштабному коэффициенту  $M_{le}$ , который равен отношению радиуса орбиты КА к радиусу сечения (окружность с центром в  $O_1$ ) земной сферы плоскостью, проходящей через наблюдаемую цель  $T_1$ :

$$M_{le} = \frac{R_s}{R_e \cos \alpha_y}, \quad (5.29)$$

$$L_{a \max} \approx 2R_s \sin \Delta\theta_s = \frac{M_{le} R_0 \lambda}{D_{xant}}, \quad (5.30)$$

$$T_{\text{synt max}} = \frac{2\Delta\theta_s}{\omega_{sg}} = \frac{R_s}{V_s} \arctg \frac{R_0\lambda}{R_e \cos \alpha_y D_{xant}} \approx \frac{M_{le} R_0 \lambda}{V_s D_{xant}}. \quad (5.31)$$

Это явление обусловлено тем, что в процессе орбитального движения луч антенны, лежащий в плоскости, которая вращается вокруг оси  $Y$ , «обкатывает» цель, увеличивая время наблюдения. Наилучшее разрешение в маршрутном режиме

$$\rho_{X \min} = \frac{R_0\lambda}{2L_{a \max}} = \frac{D_{xant}}{2M_{le}}. \quad (5.32)$$

Ширина спектра доплеровских частот с учетом формулы (5.21)

$$\Delta F_{\text{Dop}} = \frac{R_s \omega_{sg} 2\alpha_{xant}}{\lambda} = \frac{2V_{sg}}{D_{xant}}. \quad (5.33)$$

В табл. 5.2 приведено сравнение параметров РСА для модели прямолинейного движения платформы и орбитального движения КА по круговой орбите. В ней введены два пересчетных параметра: масштабный коэффициент пересчета параметров орбитального движения к эквивалентной модели прямолинейного движения  $M_{le}$  и линейная эквивалентная скорость  $V_{le}$ , значение которой характеризует крутизну временной зависимости принимаемых ЛЧМ-сигналов по азимуту:

$$M_{le} = R_s / R_e \cos \alpha_y, \quad (5.34)$$

$$V_{le} = \sqrt{2C_2 R_0} \approx V_{sg} / \sqrt{M_{le}}, \quad (5.35)$$

**Глава 5. Расчет параметров траекторного сигнала ...**

где  $C_2 = \frac{1}{2} \frac{d^2}{dt^2} R(t)$  – коэффициент разложения временной зависимости дальности в степенной ряд.

**Таблица 5.2. Сравнение параметров РСА для орбитального движения платформы и модели прямолинейного движения**

Параметр	Модель прямолинейного движения	Орбитальное движение
Путевая скорость КА, м/с	$V_{sg}$	$V_{sg}$
Горизонтальный размер антенны, м	$D_{le} = D_{xant} / M_{le} *$	$D_{xant}$
Зона облучения по азимуту, м	$X_{ant} = R_0 \lambda M_{le} / D_{xant}$	$X_{ant} = R_0 \lambda M_{le} / D_{xant}$
Наклонная дальность наблюдения, м	$R_0$	$R_0$
Ширина спектра принимаемого сигнала, Гц	$\Delta F_{Dop} = 2V_{sg} / D_{xant}$	$\Delta F_{Dop} = 2V_{sg} / D_{xant}$
Длина синтезированной апертуры, м	$L_a = R_0 \lambda / D_{le}$	$L_a = M_{le} R_0 \lambda / D_{xant}$
Время синтеза, с	$T_{synt} = R_0 \lambda / D_{le} V_{sg}$	$T_{synt} = M_{le} R_0 \lambda / D_{xant} V_{sg}$
Разрешение по азимуту, м	$\rho_x = D_{le} / 2$	$\rho_x = D_{xant} / 2M_{le}$
Закон изменения дальности по времени, м	$R(t) = \sqrt{R_0^2 + (V_{le} t)^2}$	$R(t) = \sqrt{R_0^2 + (V_{sg} t / \sqrt{M_{le}})^2} + \dots$
Закон изменения доплеровской частоты, Гц	$F_{Dop}(t) = \frac{V_{le}^2 t}{R_0 \lambda}$	$F_{Dop}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left( -2\pi \frac{2R(t)}{\lambda} \right)$

П р и м е ч а н и е : \* – эквивалентное значение горизонтального размера антенны.

Поясним полученные соотношения на примерах. Рассмотрим гипотетические РСА S-диапазона волн для двух вариантов – низкоорбитальный РСА на круговой орбите с радиусом орбиты  $R_{s1}=6900$  км (средняя высота 528,7 км) и высокоорбитальный РСА на геосинхронной орбите (ГСХО) с радиусом  $R_{s2}=42164$  км. Соответствующие орбитальные скорости КА составляют 7600 и 3074,7 м/с.

Зададим углы наклона орбит  $i_0=85^\circ$ , горизонтальный размер антенны РСА  $D_{xant}=10$  м. Проведем расчеты параметров маршрутного режима при угле падения  $\mu=70^\circ$ .

Вычисленные по приведенным в разделах 5.5 и 5.6 формулам значения параметров обзора для вариантов РСА представлены в табл. 5.3.

По существу, при движении платформы с РСА по круговой орбите происходят два явления:

1) «подфокусировка» синтезированной апертуры, которая эквивалентна гетеродинированию азимутального ЛЧМ-сигнала с опорной функцией, имеющей меньшую



### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

(для космических РСА) крутизну ЛЧМ. При ограниченном секторе синтеза закон изменения частоты сигнала остается линейным и после такой процедуры;

2) эффект «слежения» за объектом наблюдения путем поворота антенны вместе с платформой относительно центра вращения, аналогичной прожекторному режиму с «протяжкой».

Приведенные в табл. 5.3 данные показывают, что учет криволинейности траектории движения платформы позволяет уточнить ряд параметров принимаемого сигнала в РСА. Так, для низкоорбитальных РСА (до 1000 км) получается выигрыш в азимутальном разрешении на 7...10 %, а для высокоорбитальных РСА – в несколько раз. При выводе формул был допущен ряд приближений. Например, оценка размера зоны облучения по азимуту на Земле (а также реализуемой длины синтезированной апертуры) дана относительно касательной к поверхности Земли (траектории полета), а не хорде, как следовало бы. Но при практических значениях угловой зоны синтеза (менее  $4,1^\circ$ ) этими погрешностями можно пренебречь. Несмотря на приближенный характер приведенных формул, они вполне пригодны для инженерных расчетов РСА.

**Таблица 5.3. Расчетные параметры для вариантов РСА**

Параметр	Обозначение	Низкоорбитальный РСА	РСА на ГСxO
Радиус орбиты КА, км	$R_s$	6900	42164
Средняя высота орбиты КА, км	$H_s$	528,7	35792,9
Орбитальная скорость КА м/с	$V_o$	7600	3074,7
Путевая скорость КА, м/с	$V_{sg}$	6977...6992	2807...4154
Наклонная дальность наблюдения, км	$R_0$	1251	39560
Центральный угол точки съемки, град	$\alpha_y$	9,87	61,8
Ширина ДНА по азимуту, град	$\alpha_{\text{ant}}$	0,63	0,63
Зона облучения по азимуту на Земле, км	$X_{\text{ant}}$	11,9	376
Ширина спектра принимаемого сигнала, Гц	$\Delta F_{\text{Dop}}$	1738...1742	561...830
Масштабный коэффициент учета кривизны орбиты	$M_{\text{le}}$	1,067	3,123
Линейная эквивалентная скорость, м/с	$V_{\text{le}}$	71327	715
Длина синтезированной апертуры, км	$L_{\text{synt}}$	11,8* / <b>13,3</b>	376* / <b>1880</b>
Время синтеза, с	$T_{\text{synt}}$	1,56* / <b>1,75</b>	122* / <b>618</b>
Азимутальное разрешение, м	$\rho_x$	5* / <b>4,38</b>	5* / <b>1</b>

Примечание: \* звездочкой отмечены значения, рассчитанные по обычным формулам для прямолинейного движения платформы со скоростью  $V_{sg}$ ; данные расчетов для криволинейного движения подчеркнуты.

### 5.5. Временная зависимость наклонной дальности цели при движении платформы по Кеплеровой орбите

Обычно цель баллистических расчетов состоит в вычислении параметров управления РСА, обеспечивающих съемку района земной поверхности с географическими координатами  $\varphi_T, \lambda_T$  при известных или прогнозируемых параметрах орбитального движения КА. При синтезе радиолокационного изображения в РСА решаемая задача имеет отличия. В ней по известным для времени съемки параметрам движения КА, заданным наклонным дальностям для начала, центра и конца строба приема должны вычисляться временные зависимости фазы и амплитуды принимаемого сигнала.

Эти зависимости используют при синтезе радиолокационного изображения (РЛИ) для вычисления опорной функции в процессе согласованной фильтрации радиоголограммы. Двумерная опорная функция согласованной фильтрации должна быть комплексно сопряженной с принятым сигналом во всем интервале наклонных дальностей строба приема и длительности синтезированной апертуры. Особо ответственным является расчет временной зависимости наклонной дальности, при котором погрешность не должна превышать малые доли длины волны (миллиметры при работе в X-диапазоне волн). Процедура расчета заключается в оценке расстояния между двумя точками, одна из которых (фазовый центр антенны РСА или, приближенно, центр масс КА) движется по орбите, а другая – точка на земной поверхности вращается вместе с Землей.

Расчеты движения КА в возмущенном гравитационном поле Земли ведут в абсолютной геоцентрической системе координат и решают уравнения, описывающие движение КА относительно точки на земной поверхности. Для расчета возмущенного движения КА используют основное уравнение динамики свободной материальной точки [95]:

$$m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F}, \quad (5.36)$$

где  $m$  – масса тела;  $\mathbf{V}$  – вектор скорости точки;  $\mathbf{F}$  – равнодействующая сил, действующих на точку.

Космический аппарат совершает неуправляемое движение под действием силы притяжения Земли и других небесных тел, силы сопротивления атмосферы, силы светового давления и иных воздействий. Сила земного притяжения является основной, определяющей движение КА по околоземной орбите. Остальные возмущающие факторы в пределах временного интервала съемки оказывают незначительное влияние по сравнению с силой притяжения Земли – их учет необходим только в случае долгосрочного прогнозирования движения КА. Рассмотрим основной из возмущающих факторов – неравномерность гравитационного поля Земли. Тогда основное уравнение динамики свободной материальной точки можно записать в виде

$$M_{\text{earth}} \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \text{grad}(U_p), \quad (5.37)$$

где  $M_{\text{earth}}$  – масса Земли;  $U_p$  – потенциал притяжения Земли или силовая функция.

Потенциал притяжения задается через разложение по сферическим функциям Лежандра, при этом, как правило, учитывают только зональные гармоники до четвертого порядка включительно в силу их определяющего влияния на движение КА:

$$U_P = \frac{\mu M_{\text{earth}}}{R_s} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^N J_n \left( \frac{R_{e\_mean}}{R_s} \right)^n P_n(\sin \varphi_s) \right\}, \quad (5.38)$$

где  $\mu$  – постоянная притяжения;  $R_{e\_mean}$  – средний экваториальный радиус Земли;  $R_s$  – величина радиус-вектора от центра Земли до центра масс КА;  $\varphi_s$  – широта подспутниковой точки КА;  $P_n(z)$  – полином Лежандра порядка  $n$ ;  $J_n$  – безразмерные постоянные, характеризующие форму и гравитационное поле Земли.

Для решения системы дифференциальных уравнений (5.37) можно применить метод численного интегрирования Адамса. По результатам расчета для заданного положения КА относительно точки визирования (при  $t = 0$ ) можно вычислить эквивалентные параметры Кеплеровой орбиты для расчета движения в пределах апертуры синтеза.

В данном разделе рассматривается модель относительного движения платформы с РСА и точечной цели на поверхности Земли с получением временной зависимости наклонной дальности сигнала от выбранной точечной цели. Для вычисления текущего положения платформы используем Кеплерову модель движения. Результаты моделирования с расчетом полосы съемки для низкоорбитального РСА и РСА на геосинхронной орбите отображаются на рисунках в меркаторской проекции.

В модели предусмотрено вычисление набора параметров, которые при реальном синтезе РЛИ будут содержаться в служебной информации к маршруту, например, отсчеты текущих координат и скоростей платформы, наклонные дальности начала и конца строга приема и т.д. Сравнение расчетных данных Кеплера движения и возмущенного движения платформы проведено в разделе 5.4.

Для упрощения дальнейшие расчеты в пределах одного витка будем вести относительно введенной в разделе 5.1 *опорной инерциальной геоцентрической системы координат*. Полезно также при анализе геометрии наблюдения локальных участков земной поверхности рассматривать сферическую модель Земли с локальным радиусом  $R_e$ . Это позволяет, не нарушая общности результатов, использовать известные формулы тригонометрии на сфере.

Приведем *основные соотношения для сферических треугольников* со сторонами  $a, b, c$  и противоположными углами  $\alpha, \beta, \gamma$ , а также формулы для решения прямоугольных сферических треугольников [25].

Теорема синусов:

$$\frac{\sin a}{\sin \alpha} = \frac{\sin b}{\sin \beta} = \frac{\sin c}{\sin \gamma}. \quad (5.39)$$

Теорема косинусов сторон

$$\cos c = \cos a \cos b + \sin a \sin b \cos \gamma. \quad (5.40)$$

Теорема косинусов углов

$$\cos \gamma = -\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \cos c. \quad (5.41)$$

Решение прямоугольного сферического треугольника:  $a, b$  – катеты,  $c$  – гипотенуза

$$\begin{aligned} \sin a &= \sin \alpha \sin c; & \cos c &= \cos a \cos b; \\ \cos \alpha &= \cos a \sin \beta; & \sin a &= \operatorname{tg} b \operatorname{ctg} \beta; \\ \cos c &= \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \beta; & \cos \alpha &= \operatorname{tg} b \operatorname{ctg} c. \end{aligned} \quad (5.42)$$

Методика расчета параметров относительного движения включает в себя следующие этапы:

- 1) задание исходных данных при  $t = 0$  для расчета движения КА;
- 2) расчет текущих координат, скорости КА в опорной инерциальной системе координат и пересчет их в гринвичскую систему координат (ГСК);
- 3) расчет географических координат точки визирования при  $t = 0$  по заданному значению наклонной дальности, характеризующей границы полосы обзора. Азимутальное положение цели задается углом отворота плоскости визирования относительно нормали к вектору орбитальной скорости КА;
- 4) расчет текущих значений (временной зависимости) наклонной дальности цели, определяющей фазу сигнала, принятого от цели.

### Исходные данные для расчета движения КА

В качестве исходных данных для расчета движения КА примем (см. рис. 5.5):

$X_{Ns}, Y_{Ns}, Z_{Ns}$  – эфемериды КА в опорной «инерциальной» системе  $OX_N Y_N Z_N$  для момента времени  $t=0$ ;

$\dot{x}_{Ns}, \dot{y}_{Ns}, \dot{z}_{Ns}$  – составляющие скорости КА (производные координат по времени);

$i_o$  – угол наклона орбиты;

$\theta_o$  – истинная аномалия КА для  $t=0$ ;

$\theta_{op}$  – аргумент перигея;

$\theta_s = \theta_o + \theta_{op}$  – аргумент широты КА (угловое положение относительно восходящего узла);

$R_s = \sqrt{X_{Ns}^2 + Y_{Ns}^2 + Z_{Ns}^2}$  – радиус орбиты КА для  $t=0$ ;

$e_o$  – эксцентриситет орбиты;

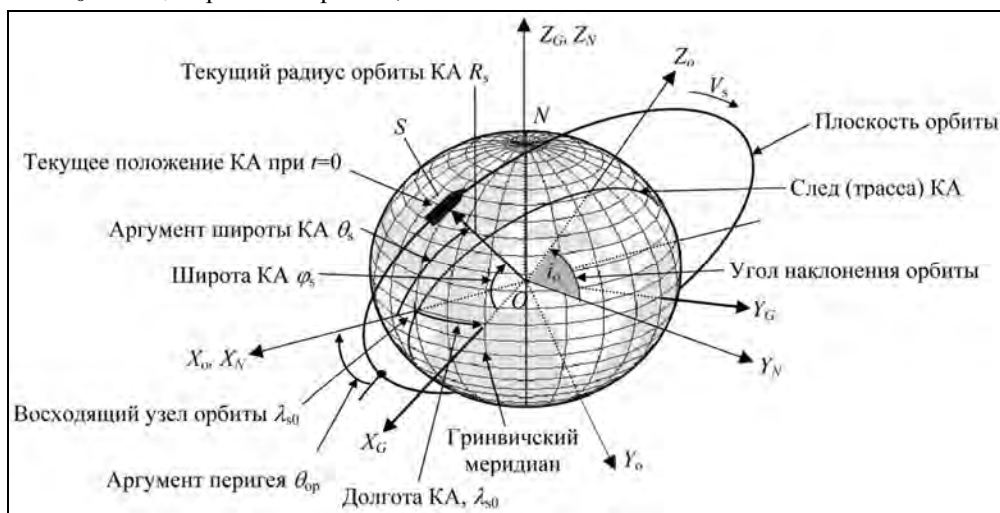


Рис. 5.5. Орбитальное движение КА

$a_o$  – большая полуось орбиты;

$V_{Hs} = e_o \sin \theta_o \sqrt{\mu_o / a_o (1 - e_o^2)}$  – вертикальная скорость;

$\mu_o = 3,98602 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$  – произведение универсальной гравитационной постоянной и массы Земли;

$\omega_o = (1 + e_o \cos \theta_o) R_s^{-1} \sqrt{\mu_o / a_o (1 - e_o^2)}$  – угловая орбитальная скорость на момент времени  $t=0$ ;

$\omega_p$  – угловая скорость прецессии орбиты.

Период обращения КА  $T_s = 2\pi / \omega_{o\_mean} \approx 2\pi / R_s^{-1} \sqrt{\mu_o / a_o}$ .

Одним из возмущений орбитального движения спутника, вызванным отличием Земли от сферы, является прецессия орбиты [458, 532/Солнечно-синхронная орбита, 532/Фигура Земли, 546]. Скорость прецессии зависит от высоты орбиты и угла наклона. Специально выбирая параметры орбиты, можно реализовать, так называемые, солнечно-синхронные орбиты, для которых солнечное время прохождения узлов (плоскости экватора) фиксировано. Объект, находящийся на такой орбите, проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время и можно реализовать точное повторение траекторий движения радиолокатора относительно поверхности Земли через несколько суток. Это позволяет применять когерентные методы дифференциальной интерферометрии для выявления изменений в окружающей обстановке.

Для реализации солнечно-синхронной орбиты ее параметры выбирают таким образом, чтобы орбита прецессировала в восточном направлении на 360 градусов в год (около 1/365 от скорости вращения Земли), компенсируя вращение Земли вокруг Солнца. Нужной скорости прецессии можно достичь лишь для определенного диапазона высот орбит (как правило, выбираются значения 600...800 км с периодами 96...100 мин.), необходимое наклонение для упомянутого диапазона высот около 98°.

Для солнечно-синхронной орбиты прецессия должна происходить в направлении, противоположном вращению Земли. Хорошее приближение дает следующая формула

$$\omega_p = -\frac{3a_e^2}{2R_s^2} J_2 \omega_o \cos i_o, \quad (5.43)$$

где  $a_e$  – экваториальный радиус Земли;  $R_s$  – радиус орбиты КА;  $\omega_o$  – угловая орбитальная скорость;  $i_o$  – наклонение орбиты;  $J_2 = 1,08 \cdot 10^{-3}$  – второй динамический фактор формы Земли, выражаемый через полярное сжатие следующим образом:

$$J_2 = \frac{2\varepsilon_e}{3} - \frac{a_e^3 \omega_e^2}{3\mu_o}, \quad (5.44)$$

где  $\varepsilon_e$  – полярное сжатие Земли;  $\omega_e$  – угловая скорость вращения Земли;  $\mu_o$  – произведение универсальной гравитационной постоянной и массы Земли.

При дальнейшем рассмотрении будем относить скорость прецессии орбиты к скорости вращения Земли, полагая ее равной  $\omega_{ep} = 7,312166 \cdot 10^{-5}$  для солнечно-синхронных орбит с  $i_o > 90$  и пренебрегая прецессией орбиты ( $\omega_{ep} = 7,2921158 \cdot 10^{-5}$ ) – для орбит с  $i_o \leq 90$ . Для моделирования относительного движения эти допущения несущественны, а опорные функции для реального синтез РЛИ будут основаны на служебной информации с фактическими координатами КА, учитывающими прецессию орбиты.

### Расчет текущих координат КА

Обычно текущие координаты КА рассчитывают методом интегрирования уравнения движения с учетом изменений текущего радиуса орбиты, угловой скорости, включая учет возмущающих воздействий (неравномерности гравитационного потенциала, влияния притяжения Луны, солнечного ветра и пр.). При кеплеровом движении имеем

$$d\theta_s = \omega_o dt, \quad (5.45)$$

$$\theta_o = \theta_s(t) - \theta_{op}, \quad (5.46)$$

$$R_s(t) = a_o (1 - e_o^2) / (1 + e_o \cos(\theta_s(t) - \theta_{op})), \quad (5.47)$$

$$\omega_o(t) = (1 + e_o \cos \theta_o(t)) R_s^{-1}(t) \sqrt{\mu_o / a_o (1 - e_o^2)}. \quad (5.48)$$

Координаты радиус-вектора КА в инерциальной системе  $Ox_N y_N z_N$

$$\mathbf{R}_s(t) = -R_s(t) \cos \theta_s(t) \mathbf{x}_N - R_s(t) \sin \theta_s(t) \cos i_o \mathbf{y}_N + R_s(t) \sin \theta_s(t) \sin i_o \mathbf{z}_N. \quad (5.49)$$

Полярные координаты КА

географическая широта

$$\varphi_s(t) = \arcsin(\sin \theta_s(t) \sin i_o); \quad (5.50)$$

географическая долгота с учетом вращения Земли

$$\lambda_{sg}(t) = \arctg(\tg \theta_s(t) \cdot \cos i_o) + \lambda_{s0} - \omega_{ep} t, \quad (5.51)$$

где  $\lambda_{s0}$  – долгота восходящего узла при  $t = 0$ ;  $\omega_{ep}$  – суммарная угловая скорость вращения Земли  $\omega_e = 7,292115 \cdot 10^{-5}$  1/с с одним оборотом за звездные сутки  $T_{star} = 86164,091$  с и скорости прецессии орбиты. Солнечные сутки –  $T_{sun} = 86400$  с – примерно на 4 мин длиннее.

Текущие координаты КА в гринвичской системе координат (ГСК) относительно неподвижной Земли определяются вектором

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_s(t) = & -\mathbf{x}_G R_s(t) \cos \varphi_s(t) \cos \lambda_{sg}(t) - \mathbf{y}_G R_s(t) \cos \varphi_s(t) \sin \lambda_{sg}(t) + \\ & + \mathbf{z}_G R_s(t) \sin \varphi_s. \end{aligned} \quad (5.52)$$

Полученная временная зависимость радиус-вектора КА будет далее использована для расчета временной зависимости наклонной дальности цели.

### Расчет координат точки визирования

Определим географические координаты цели  $T(\varphi_T, \lambda_T)$ , сигнал от которой при  $t = 0$  будет зафиксирован в  $k$ -м отсчете цифровой радиоголограммы (ЦРГ) в пределах строба приема. Временная задержка этого отсчета ЦРГ относительно начала излученного импульса передатчика определит наклонную дальность  $R_0$  до цели. Положение КА (точка  $S$ ) в плоскости орбиты  $OX_oY_oZ_o$  определено аргументом широты  $\theta_s$  (угол  $X_oOS$  на рис. 5.1). След КА на поверхности Земли при  $t=0$  показан на рис. 5.6 точкой  $F$  с географическими координатами  $\varphi_s, \lambda_s$ .

Азимутальное положение наблюдаемой цели на земной поверхности определится углом поворота  $\psi_v$  плоскости визирования  $Y_vOZ_v$  относительно плоскости орбиты, задаваемого в связанной с КА подвижной системе координат  $SX_sY_sZ_s$ . В ней ось  $OZ_s$  направлена в зенит, ось  $OX_s$  параллельна вектору орбитальной скорости, а ось  $OY_s$  дополняет систему до правой. Положительное значение угла  $\psi_v$  плоскости визирования относительно нормали к плоскости орбиты  $OY_s$  соответствует левостороннему обзору (показано на рисунке). Наклонная дальность отсчета ЦРГ (расстояние  $ST$ ) определит положение цели.

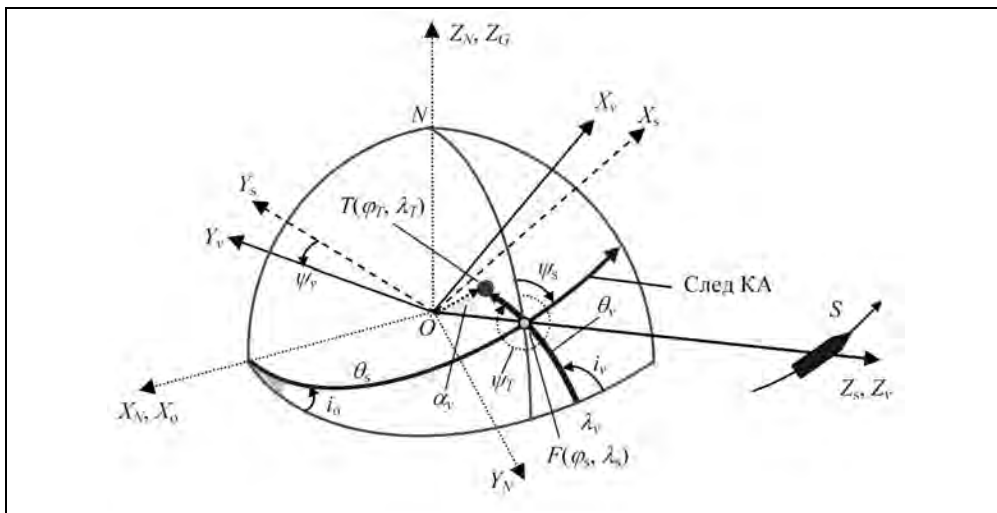


Рис. 5.6. Геометрия вычисления координат точки визирования

Для ориентировочных расчетов используем среднее значение радиуса Земли  $R_{e\_mean} = 6371$  км [533]. При строгих расчетах опорной функции синтеза изображений с высоким разрешением следует учитывать локальное возвышение рельефа местности над уровнем земного эллипсоида  $R_T = R_e + H_T$ , где  $R_e = a\sqrt{1 - e_e^2} / \sqrt{1 - e_e^2 \cos^2 \varphi_T}$  – радиус Земли на широте цели  $\varphi_T$ , а  $H_T$  – локальная высота рельефа.

Исходными параметрами для расчета положения точки визирования являются географические координаты следа КА  $F(\varphi_s, \lambda_s)$ , углы поворота плоскости визирования  $OY_v$  относительно нормали к плоскости орбиты  $\psi_v$ , центральный угол  $\alpha_y$  точки

визирования  $T$ , соответствующий ее наклонной дальности. Расчет географической координаты точки визирования проведем по (5.50) и (5.51) с учетом текущего угла между вектором скорости КА и меридианом, проходящим через след КА при  $t=0$  (курсовой угол КА  $\psi_s$  отсчитывается от направления на Север по часовой стрелке)

восходящий виток

$$\psi_s = \arcsin\left(\frac{\cos i_o}{\cos \varphi_s}\right), |\theta_s| \leq \frac{\pi}{2}; \quad (5.53)$$

нисходящий виток

$$\psi_s = \pi - \arcsin\left(\frac{\cos i_o}{\cos \varphi_s}\right), |\theta_s| > \frac{\pi}{2}.$$

Рассмотрим геометрию, показанную на рис. 5.6. В плоскости визирования  $OY_vZ_v$  построим проходящую через след КА  $F$  виртуальную орбиту с радиусом  $R_e$ , равным радиусу Земли на широте  $\varphi_s$ . Ее параметрами будут: угол наклоения  $i_v$ , аргумент широты следа КА  $\theta_v$ , долгота восходящего следа  $\lambda_v$ . Дуга этой виртуальной орбиты будет геометрическим местом пересечения плоскости визирования с поверхностью Земли.

Параметры виртуальной орбиты

угол наклоения

$$i_v = \arccos(\sin \psi_T \cos \varphi_s), \quad (5.54)$$

где  $\psi_T = \frac{3\pi}{2} + \psi_s - \psi_v$  – азимут точки визирования;

аргумент широты следа КА (удаление от экватора по дуге большого круга):

$$\theta_v = \arcsin\left(\frac{\sin \varphi_s}{\sin i_v}\right); \quad (5.55)$$

долгота узла:

$$\lambda_v = \lambda_s + \arctg(\tg \theta_v \cos i_v). \quad (5.56)$$

Положение точки визирования (дуга  $FT$ , угол  $\alpha_y$  на рисунке) определится ее центральным углом относительно следа КА

$$\alpha_y = \arccos\left(\frac{R_s^2 + R_T^2 - R_0^2}{2R_s R_T}\right), \quad (5.57)$$

откуда аргумент широты точки визирования на виртуальной орбите (знак «плюс» при обзоре левым бортом и «минус» – при обзоре правым бортом)

$$\theta_T = \theta_v \pm \alpha_y \quad (5.58)$$

и гринвичские координаты точки визирования

$$\varphi_T = \arcsin(\sin \theta_T \sin i_v), \quad (5.59)$$





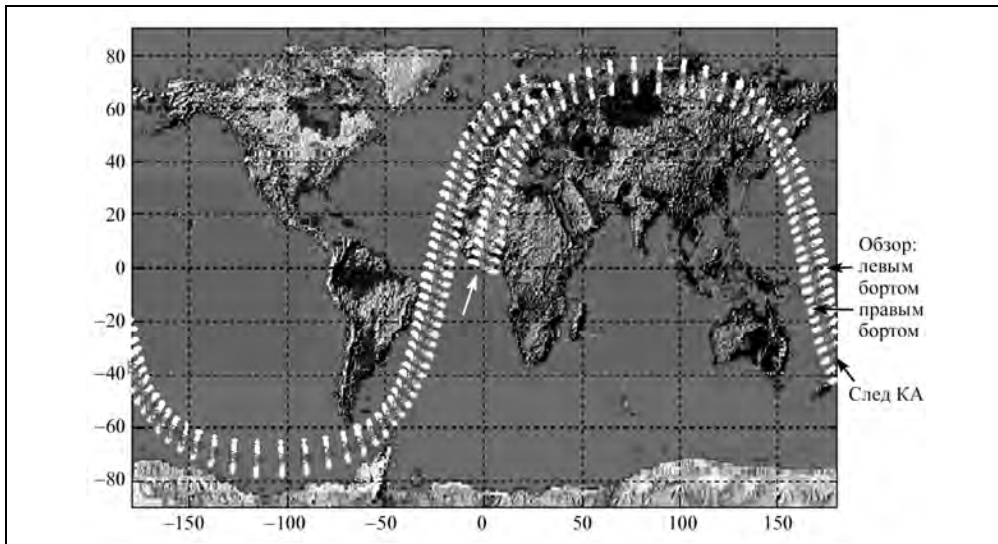
мированием луча, отклоненного назад примерно на  $5^\circ$  относительно нормали к плоскости антенны. Координаты обнаруженных целей рассчитывались с учетом поправок по азимуту в зависимости от наклонной дальности целей.

Направление луча антенны определяет значение средней доплеровской частоты принятого сигнала («доплеровского центроида») в РСА, которое нужно учитывать при синтезе изображения. Необходимо рассматривать влияние «бега Земли», вызванное двумя факторами отворотом луча от нормали к плоскости орбиты и вращением Земли. Временные зависимости наклонной дальности и доплеровской частоты вычисляются по заданному в параметрической форме (5.45)–(5.49) уравнению движения КА с учетом изменения входящих в него параметров орбиты КА с последующим вычитанием вектора координат точки визирования (5.61):

$$R_T(t) = |\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_T| = \left\{ \left( R_s(t) \cos \varphi_s(t) \cos \lambda_{sg}(t) - R_T \cos \varphi_T \cos \lambda_T \right)^2 + \left( R_s(t) \sin \varphi_s(t) \sin \lambda_{sg}(t) - R_T \cos \varphi_T \sin \lambda_T \right)^2 + \left( R_s(t) \sin \varphi_s - R_T \sin \varphi_T \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (5.63)$$

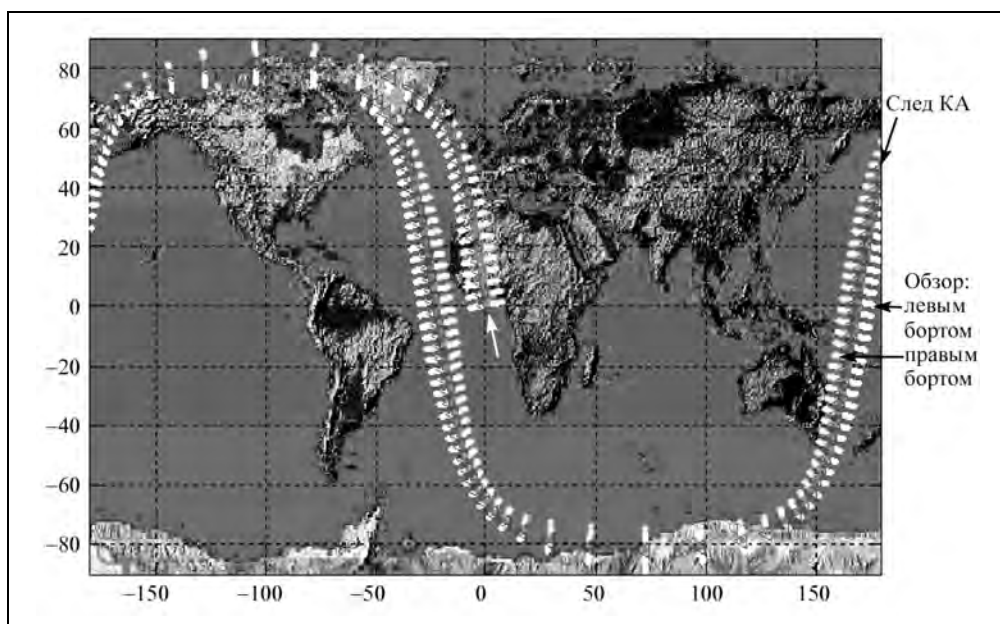
Доплеровскую частоту вычисляют через производную дальности (5.63) по времени с учетом формул (5.24, 5.47, 5.48, 5.50–5.52, 5.61).

На рис 5.8 и 5.9 приведены отображения трасс КА и полос обзора в Меркаторской картографической проекции для современных низковысотных РСА. Восходящий узел орбиты показан на гринвичском меридиане, направление движения следа КА показано стрелкой. Отображено 1,2 периода обращения спутника, что позволяет увидеть смещение области наблюдения, вызванное вращением Земли. Плоскость визирования нормальна к плоскости орбиты  $\psi_s=0$ .

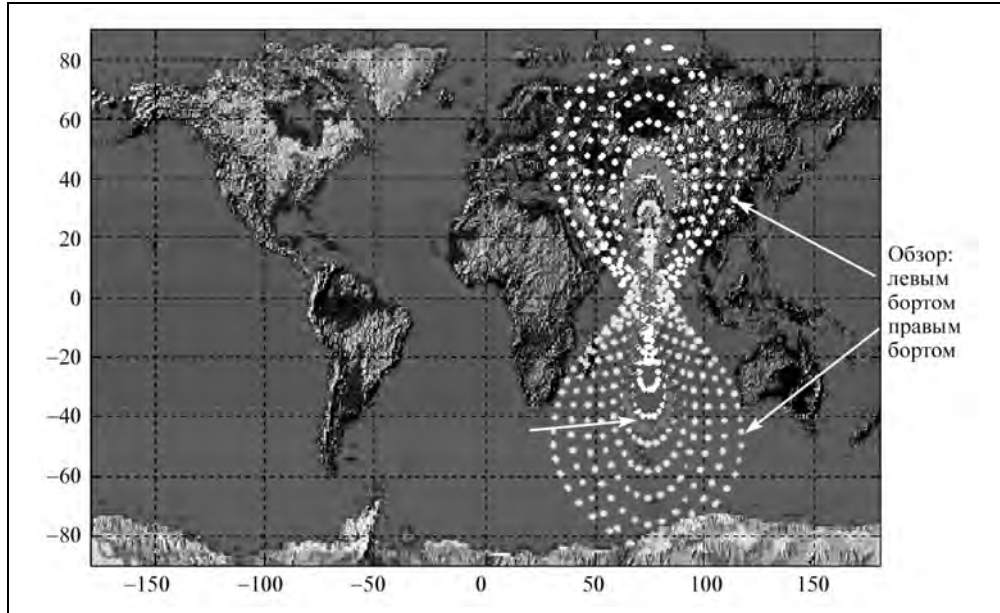


**Рис. 5.8.** Отображения трасс КА и границ полос двустороннего обзора (высота орбиты 300 км, угол наклона  $72^\circ$  (РСА «Меч-КУ»), полоса обзора  $2 \times 500$  км, удаление от трассы КА 200...700 км; периодичность отсчетов 10 мин)

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

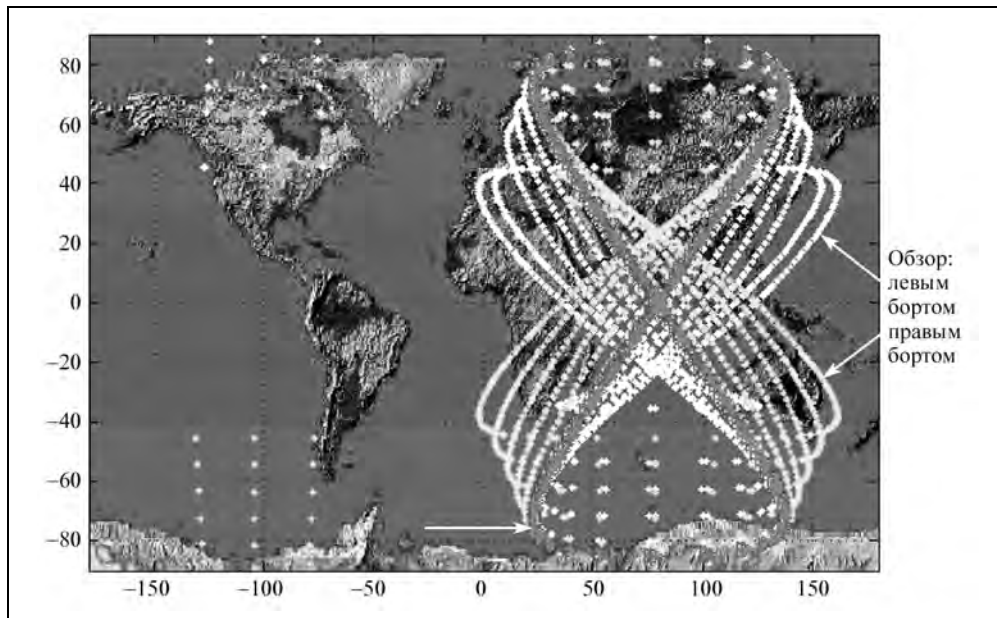


**Рис. 5.9.** Отображения трасс КА и границ полос двустороннего обзора (высота орбиты 514 км, орбита солнечно-синхронная с углом наклоения 98,2° (РСА TerraSAR-X), полоса обзора 2×500 км, удаление от трассы КА 300...800 км; периодичность отсчетов 10 мин)



**Рис. 5.10.** Отображение суточной трассы КА и границ полос двустороннего обзора для РСА на геосинхронной орбите с высотой 35894,5 км и углом наклоения 45° (полоса обзора 2×5000 км, удаление от трассы КА 500...5500 км; периодичность отсчетов 30 мин)

На рис. 5.10 рассмотрен случай высокоорбитального РСА на геосинхронной орбите (ГСхО), оценка характеристик которого при работе в разных диапазонах волн сделана в статье [439\*]. Преимущество рассмотрения режима работы РСА на ГСхО состоит в том, что этот режим является эффективным инструментом для проверки формул геометрии относительного движения для общего случая высокоорбитальных РСА. Для РСА на ГСхО при углах наклона менее  $90^\circ$  траектория следа КА (отмечен стрелкой) на земной поверхности имеет вид, напоминающий цифру «8». Долгота восходящего узла составляет  $75^\circ$ , угол наклона орбиты –  $45^\circ$ . Такие параметры обеспечивают обзор большой площади территории России. При большем угле наклона ( $\sim 85^\circ$ ) геосинхронной орбиты, как это показано на рис. 5.11, возможен в течение суток обзор районов земной поверхности по другую сторону относительно Северного или Южного полюсов.



**Рис. 5.11.** Отображение суточной трассы КА и границ полос двустороннего обзора для РСА на геосинхронной орбите с высотой 35894,5 км и углом наклона  $85^\circ$  (полоса обзора  $2 \times 5000$  км, удаление от трассы КА 500...5500 км; периодичность отсчетов 10 мин)

Приведенные в данном разделе формулы могут использоваться для расчетов полосы обзора и полосы съемки, а также временных зависимостей наклонной дальности и фазы в режимах бокового и скошенного обзоров при движении по круговым и эллиптическим орбитам. Используемая модель Кеплера движения может быть уточнена на локальных участках путем замены модельных координат КА на рассчитанные для реального случая возмущенного движения КА. Следующая информация, знание которой необходимо для формирования опорной функции синтеза и оценки разрешающей способности по азимуту, касается амплитуды при-

нимаемого сигнала. Для ее расчета целесообразнее использовать систему координат, адаптированную к геометрии радиолокационного обзора.

## **5.6. Параметры сигналов, принимаемых антенной РСА**

### **5.6.1. Система координат, адаптированная к геометрии радиолокационного обзора**

Задача оценки текущей наклонной дальности между точкой на земной поверхности и фазовым центром антенны была рассмотрена в предыдущем разделе. По этим данным рассчитывают фазу и доплеровскую частоту (производную фазы) принятого сигнала для их учета в опорной функции синтеза РЛИ. Следующий набор данных, требуемый для синтеза РЛИ, а также оценки реализуемого разрешения вдоль линии пути (по азимуту) относится к параметрам сигналов, принимаемых антенной РСА: огибающей, ширине спектра доплеровских частот, средней доплеровской частоте, которые определяются рассмотренными выше параметрами относительно движения, а также шириной ДНА, углами ориентации антенны и т.д. Влияние этих фактов удобнее анализировать в системе координат, адаптированной к радиолокационному обзору.

Для вывода компактных формул, позволяющих непосредственно вычислять параметры относительного движения с учетом углов ориентации осей КА (или направления луча антенны РСА), рассмотрим приведенные на рис. 5.7 геоцентрические системы координат. Примем ряд допущений, упрощающих анализ без снижения общности для практических параметров радиолокационного обзора:

1) представим геоид сферической моделью с радиусом  $R_e$ , равным локальному радиусу земного эллипсоида на широте точки визирования;

2) представим систему координат  $Ox_s Y_s Z_s$  «замороженной», а орбитальное движение отнесем с обратным знаком к земной поверхности с угловой скоростью  $\omega_o$  относительно оси вращения  $OY_s$ , направленной в противоположную сторону по отношению к оси  $OY_o$ ;

3) влияние эллиптичности орбиты выразим через вектор вертикальной скорости, направленный вдоль оси  $OZ_s$ .

Сначала рассмотрим круговую орбиту КА. Найдем проекции суммы угловых скоростей орбиты и вращения Земли на оси системы  $Ox_v Y_v Z_v$ . Заметим, что поскольку оси лежат в плоскости орбиты, то проекции орбитальной скорости КА на них равны нулю. Орбитальное движение КА в координатной системе  $Ox_s Y_s Z_s$ , приведенной на рис. 5.12, характеризуется составляющими

$$\omega_{ox_s} = 0; \quad \omega_{oy_s} = \omega_o; \quad \omega_{oz_s} = 0. \quad (5.64)$$

Проекция орбитальной скорости КА определяются углом  $\psi_v$  поворота плоскости визирования  $Y_v OZ_v$  вокруг оси  $OZ_s$  относительно нормали к плоскости орбиты  $OY_s$  и равны

$$\omega_{ox_v} = \omega_o \sin \psi_v; \quad \omega_{oy_v} = \omega_o \cos \psi_v; \quad \omega_{oz_v} = 0. \quad (5.65)$$

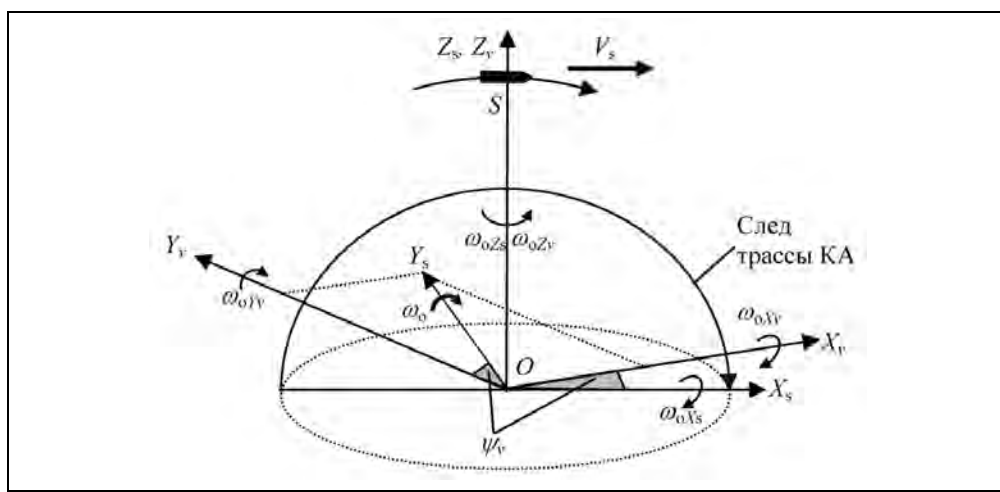


Рис. 5.12. Проекции угловой скорости орбиты КА на координатные оси плоскости визирования

Проекции угловой скорости вращения Земли (плюс прецессия орбиты) на координатные оси системы  $OX_vY_vZ_v$  из инерциальной системы  $OX_NY_NZ_N$  определяются тремя поворотами, как это показано на рис. 5.13:

- 1) из инерциальной системы  $OX_NY_NZ_N$  в орбитальную  $OX_oY_oZ_o$  вокруг оси  $OX_N$  на угол  $i_o$ ;
- 2) из орбитальной  $OX_oY_oZ_o$  системы в подвижную  $OX_sY_sZ_s$ , связанную с КА, вокруг оси  $OX_o$  на угол  $\theta_s$ ;
- 3) из подвижной системы  $OX_sY_sZ_s$  в связанную с КА координатную систему визирования  $OX_vY_vZ_v$  вокруг оси  $OZ_s$  на угол  $\psi_v$ .

Соответственно для проекций угловой скорости вращения Земли имеем

$$\omega_{eX_o} = 0; \quad \omega_{eY_o} = -\omega_{ep} \cos i_o; \quad \omega_{eZ_o} = \omega_{ep} \sin i_o; \quad (5.66)$$

$$\omega_{eX_s} = \omega_{ep} \sin i_o \cos \theta_s; \quad \omega_{eY_s} = \omega_{ep} \cos i_o; \quad \omega_{eZ_s} = \omega_{ep} \sin i_o \sin \theta_s,$$

откуда

$$\begin{aligned} \omega_{eX_v} &= \omega_{eX_s} \cos \psi_v + \omega_{eY_s} \sin \psi_v = \omega_{ep} (\sin i_o \cos \theta_s \cos \psi_v + \cos i_o \sin \psi_v); \\ \omega_{eY_v} &= -\omega_{eX_s} \sin \psi_v + \omega_{eY_s} \cos \psi_v = \omega_{ep} (-\sin i_o \cos \theta_s \sin \psi_v + \cos i_o \cos \psi_v); \\ \omega_{eZ_v} &= \omega_{ep} \sin i_o \sin \theta_s. \end{aligned} \quad (5.67)$$

Геометрия поворотов представлена на рис. 5.13. Для совместного движения с «замороженным» положением КА получаем

$$\begin{aligned} \omega_{X_v} &= -\omega_{oX_v} + \omega_{eX_v} = -\omega_o \sin \psi_v + \omega_{ep} (\sin i_o \cos \theta_s \cos \psi_v + \cos i_o \sin \psi_v); \\ \omega_{Y_v} &= -\omega_{oY_v} + \omega_{eY_v} = -\omega_o \cos \psi_v - \omega_{ep} (\sin i_o \cos \theta_s \sin \psi_v - \cos i_o \cos \psi_v); \\ \omega_{Z_v} &= \omega_{ep} \sin i_o \sin \theta_s. \end{aligned} \quad (5.68)$$

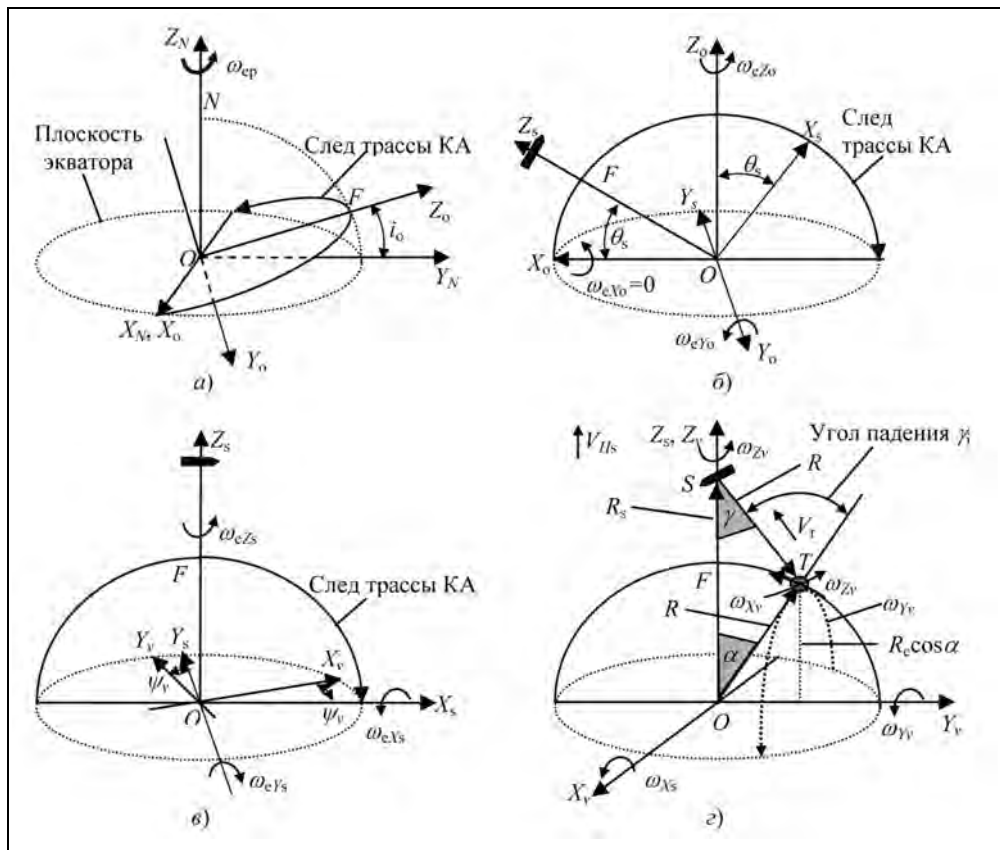


Рис. 5.13. Проекция угловой скорости вращения Земли на координатные оси системы: а – положение плоскости орбиты; б – поворот вокруг оси  $OX_0$ ; в – поворот вокруг оси  $OZ_s$ ; г – геометрия движения точки визирования (левосторонний обзор)

Найдем путевую скорость следа КА для случая круговой орбиты КА. Как следует из рис. 5.13, в, линейная скорость следа КА (точка  $F$  на оси  $OZ_s$ ) определяется двумя составляющими – тангенциальной  $-\omega_o + \omega_{eY_s}$  и нормальной  $\omega_{eX_s}$ . Поэтому суммарная путевая угловая скорость, вызванная орбитальным движением КА и вращением Земли, определится из формул (5.64) и (5.66)

$$\omega_{sg} = \sqrt{(-\omega_o + \omega_{eY_s})^2 + \omega_{X_s}^2} = \sqrt{(-\omega_o + \omega_{ep} \cos i_o)^2 + (\omega_{ep} \sin i_o \cos \theta_s)^2}. \quad (5.69)$$

Рассмотрим влияние составляющих угловых скоростей по осям координатной системы визирования точки наблюдения, показанной на рис. 5.13, г. Составляющая  $\omega_{X_v}$  приводит к появлению радиальной составляющей скорости  $V_r$  вдоль линии визирования, которая вызывает сдвиг доплеровской частоты принимаемого сигнала, вызванного вращением Земли. Радиальная скорость пропорциональна проекции касательной к окружности Земли в точке  $T$ , которая вычисляется через угол паде-

ния  $\gamma$ , и зависит от удаления точки визирования от трассы КА, характеризуемого центральным углом  $\alpha_y$

$$V_r = R_e \omega_{Xv} \sin \gamma_i = R_e \left( -\omega_o \sin \psi_v + \omega_{ep} (\sin i_o \cos \theta_s \cos \psi_v + \cos i_o \sin \psi_v) \right) \frac{R_s \sin \alpha_y}{R_0}, \quad (5.70)$$

где  $\gamma = \pi - \arcsin\left(\frac{R_s}{R_0} \sin \alpha_y\right)$  – угол падения;  $R_0 = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos \alpha_y}$  – наклонная дальность точки визирования.

### 5.6.2. Зависимости доплеровской частоты принимаемого сигнала от аргумента широты КА

При движении КА по орбите в случае ориентации его осей в ОСК ( $\psi_v=0$ ) доплеровская частота принимаемого сигнала будет изменяться, отличаясь от нуля. Это соответствует скошенному обзору. Графики изменения доплеровской частоты в зависимости от аргумента широты КА приведены на рис. 5.14, а для длины волны РСА  $\lambda=5,6$  см (соответствует РСА Radarsat-1). Рассмотрен случай движения по круговой орбите (кривая 1 для ближней границы полосы обзора 200 км и кривая 2 для дальней границы 800 км). Приведенные на рисунке кривые 3, 4 характеризуют увеличенные в 10 раз дополнительные составляющие, вызванные вертикальной скоростью для орбиты с эллиптичностью  $e_o=0,0025$ , при которой отклонения от средней высоты не превышают  $\pm 10$  км.

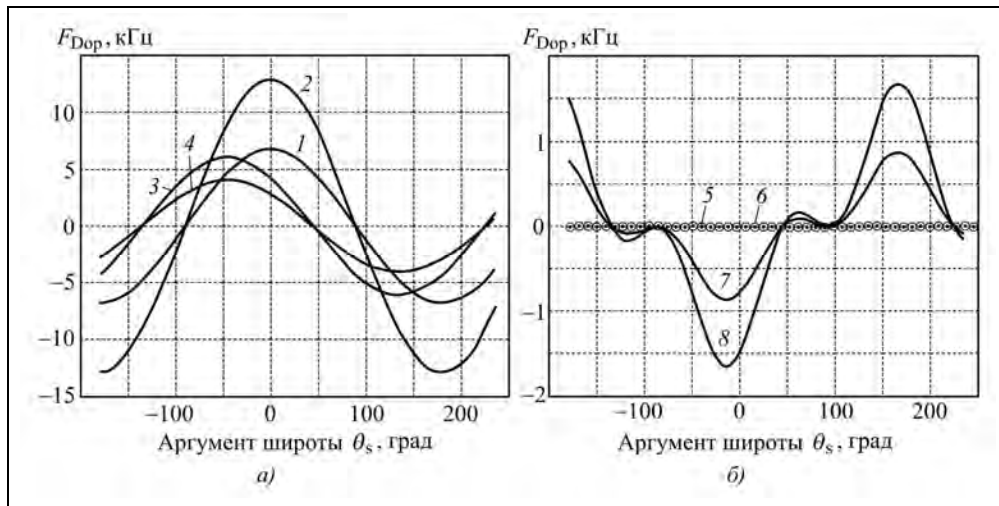


Рис. 5.14. Графики зависимостей доплеровской частоты сигнала от аргумента широты КА:  
 а – ориентация осей КА в ОСК; б – ориентация осей КА в ПСК  
 (высота орбиты 743 км, наклонение 92,6°, аргумент перигея – минус 45°, обзор левым бортом, длина волны РСА 5,6 см)



Как следует из рис. 5.14,а, изменения доплеровской частоты для длины волны РСА 5,6 см могут достигать  $\pm(6\dots 12)$  кГц в экваториальных районах. Для антенны с горизонтальным размером  $D_{\text{xant}}=15$  м, как у Radarsat-1, ширина спектра доплеровских частот сигнала равна  $\Delta F_{\text{Dop}}=2V_r/D_{\text{xant}} \sim 3$  кГц, и выбранная частота повторения близка к этой величине. Поскольку доплеровская частота может значительно превышать частоту повторения, возникает неоднозначность сигналов по азимуту, для устранения которой в РСА Radarsat-1 используют сложные алгоритмы. Особенно сложна компенсация смещения доплеровской частоты в режиме Скансар.

При строго боковом обзоре доплеровское смещение частоты в центре луча должно быть равно нулю, что реализуют путем ориентации осей КА в путевой системе координат (ПСК). Ориентация осей КА в ПСК осуществляется в большинстве современных РСА. Она достигается путем поворота КА по курсу на угол  $\psi_v$  в пределах  $\pm 4,5^\circ$ , при котором вращение Земли компенсируется радиальной составляющей орбитальной скорости

$$\psi_v = \psi_0 = -\arctg \left\{ \frac{\omega_{\text{ep}} \sin i_o \cos \theta_s}{\omega_o - \omega_{\text{ep}} \cos i_o} \right\} = -\arcsin \left\{ \frac{\omega_{\text{ep}} \sin i_o \cos \theta_s}{\omega_{\text{sg}}} \right\}, \quad (5.71)$$

где  $\omega_{\text{sg}}$  – модуль суммарной угловой скорости согласно (5.69).

На рис. 5.14, б показаны графики доплеровской частоты сигнала в плоскости визирования при ориентации осей КА в ПСК для круговой орбиты — кривые 5 и 6 совпадают независимо от дальности обзора. Для эллиптической орбиты можно вычислить поправку к доплеровской частоте, вызванную эллиптичностью орбиты, если учесть вертикальную составляющую скорости  $V_{Hs}$ :

$$V_{Hs} = e_o \sin \theta_o \sqrt{\mu_o / a_o (1 - e_o^2)}, \quad (5.72)$$

$$F_{\text{DopH}} = \frac{2V_{Hs} \cos \gamma}{\lambda}, \quad (5.73)$$

где  $\theta_o = \theta_s - \theta_{\text{op}}$  – истинная аномалия КА;  $a_o$  – большая полуось орбиты;  $\gamma$  – угол визирования. На рис. 5.14, б приведены кривые для доплеровской частоты при эллиптической орбите с компенсацией вертикальной скорости на ближней границе 7 или на дальней границе 8 полосы обзора.

Для практически используемых в РСА орбит, близких к круговым, величина доплеровских смещений от эллиптичности орбиты невелика и составляет долю от ширины доплеровского спектра сигналов (до 550 Гц, см. увеличенные в 10 раз кривые 3 и 4 на рис. 5.14, а). Принципиально возможна компенсация этих смещений путем дополнительного разворота КА по курсу, но не во всей полосе обзора, а только в режимах съемки с узкой полосой. Суммарный компенсирующий угол поворота вычисляют по формуле

$$\psi_0 = -\arctg \left\{ \frac{\omega_{\text{ep}} \sin i_o \cos \theta_s + V_{Hs} \cos \gamma / R_e \sin \gamma_i}{\omega_o - \omega_{\text{ep}} \cos i_o} \right\}, \quad (5.74)$$

где  $\gamma$  – угол визирования от надира;  $\gamma_i$  – угол падения.

Результат такой компенсации для ближней и дальней границ полосы обзора показан на рис. 5.14,б, кривые 7 и 8. При среднем значении компенсирующего угла можно снизить доплеровское смещение от эллиптичности орбиты до  $\pm 270$  Гц по всей полосе обзора. Заметим, что независимо от компенсации доплеровского смещения, наличие вертикальной скорости приводит к нарушению строго бокового обзора (когда равна нулю доплеровская частота точек на земной поверхности в ее сечении вертикальной плоскостью, нормальной к следу КА). Азимутальная ошибка пропорциональна отношению  $V_{Hs}/V_{sg}$  и зависит от ширины полосы съемки.

### 5.6.3. Тангенциальная составляющая скорости относительного движения

Найдем тангенциальную составляющую скорости суммарного движения КА относительно цели. Она определяет угловую скорость движения цели по отношению к лучу антенны РСА, а, значит максимальное время синтеза в маршрутном режиме или скорость разворота луча в прожекторном режиме обзора. Для круговой орбиты тангенциальная составляющая скорости определится суммой составляющих угловых скоростей  $\omega_{Y_v}$  и  $\omega_{Z_v}$ , а также проекциями радиус-вектора цели на оси  $OY_v$  и  $OZ_v$ ,

$$\begin{aligned} V_t &= -R_e (\omega_{Y_v} \cos \alpha_y - \omega_{Z_v} \sin \alpha_y) = \\ &= -R_e \left\{ \left( -\omega_o \cos \psi_v - \omega_{ep} (\sin i_o \cos \theta_s \sin \psi_v - \cos i_o \sin \psi_v) \right) \cos \alpha_y - \right. \\ &\quad \left. - \omega_{ep} \sin i_o \sin \theta_s \sin \alpha_y \right\}. \end{aligned} \quad (5.75)$$

Знак «минус» служит для перехода от модели «замороженного» КА к движению КА относительно точки визирования на вращающейся земной поверхности.

В маршрутном режиме ось луча антенны РСА должна находиться в вертикальной плоскости  $OY_v Z_v$  (рис. 5.13, з). В прожекторном режиме съемки ось луча должна быть направлена на центр снимаемого кадра. Это может быть достигнуто двумя способами:

1) если в РСА используют антенну со сканированием ДНА по азимуту (например, АФАР), то луч поворачивают в плоскости  $SP_1 P_2$  (рис. 5.4), направляя его в точку  $T_1$  с угловой скоростью

$$\omega_{xant} = \pm V_t / R_0, \quad (5.76)$$

где

$$R_0 = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos a_y} \quad (5.77)$$

– минимальная наклонная дальность до цели; знак «плюс» – при левостороннем обзоре и «минус» – при правостороннем обзоре. Для случая высокоорбитального РСА предполагается, что ширина луча антенны значительно меньше углового размера Земли;

2) если в РСА не применяют антенны со сканированием по азимуту (например, РСА ТЕCSAR [385]), то для прожекторного режима выполняют разворот КА по курсу относительно направления в зенит с угловой скоростью

$$\omega_{sT} = \pm V_t / R_e \sin \alpha_y. \quad (5.78)$$

Выражение (5.76) позволяет для маршрутного режима съемки оценить максимальное время синтеза апертуры, равное времени пребывания цели в азимутальном луче ДНА

$$T_{\text{synt\_max}} = \frac{\alpha_{\text{ant}}}{|\omega_{x\text{ant}}|} = \frac{R_0 \lambda}{D_{x\text{ant}} |V_t|}, \quad (5.79)$$

где  $\alpha_{x\text{ant}}$  – ширина ДНА по азимуту.

Данная формула уточняет приведенное в разделе 5.3 ориентировочное значение времени синтеза для круговой орбиты (5.31), не учитывающее вращение Земли.

На рис. 5.15, а дается сравнение зависимостей скорости следа КА и тангенциальной скорости от аргумента широты КА для низкоорбитального РСА и РСА на ГСХО при углах наклона орбит, равных 85°. Масштаб кривых для низкоорбитального РСА (1а – для следа КА и 2а – для тангенциальной скорости при угле падения 80°) уменьшен в 10 раз, скорости близки к 7000 м/с. Для РСА на ГСХО: кривая 2а – скорость следа КА, кривые 2б, 3б, 4б – тангенциальная скорость при углах падения 20, 45 и 80° соответственно. В РСА на ГСХО тангенциальная скорость для отдельных участков маршрута может менять знак и обращаться в нуль в отдельных аномальных точках (точках «стационарности») с определенной наклонной дальностью.

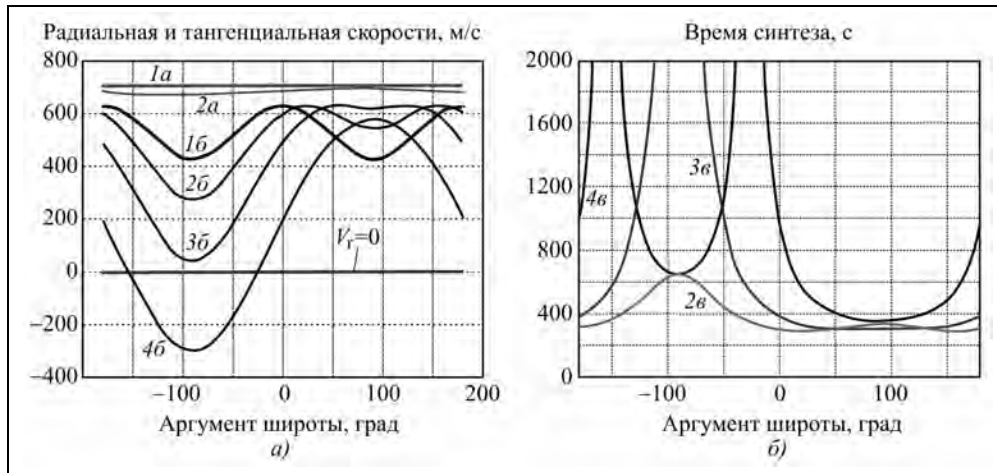


Рис. 5.15. Графики зависимости тангенциальной скорости для низкоорбитального РСА и РСА на ГСХО (а) и времени синтеза в маршрутном режиме от аргумента широты КА для РСА на ГСХО (б) (значения кривых 1а, 2а следует умножить в 10 раз)

Изменение знака тангенциальной скорости в РСА на ГСХО происходит, когда КА находится в высоких широтах на больших дальностях, если луч антенны заходит за полюс (Северный при обзоре левым бортом и Южный – при обзоре правым бортом), где направление движения точек на Земле совпадает с движением КА и скорости вычитаются. Появляются аномальные точки «стационарности», в кото-

рых КА совершает круговое движение относительно «мгновенного центра» на Земле. Происходят два явления. Во-первых, луч антенны в течение длительного времени направляется на цель, как при прожекторном режиме. При этом возможно получение высокого азимутального разрешения. Во-вторых, доплеровская частота сигнала для точки мгновенного центра в течение длительного времени равна нулю. Этот случай аналогичен самолетному РСА при полетах по круговой траектории [353] и эквивалентен фильтрации ЛЧМ-сигнала методом гармонического анализа, при котором точки, смещенные по азимуту, имеют постоянное смещение по частоте, что позволяет их различать на выходе фильтра обработки.

На рис. 5.15,а показан также график радиальной скорости  $V_r$  (жирная линия). Она равна нулю для всех углов падения, поскольку реализуется боковой обзор с ориентацией КА в ПСК.

На рис. 5.15,б приведены зависимости времени синтеза в маршрутном режиме от аргумента широты КА для РСА на ГСХО (кривые 2в, 3в, 4в) для ширины луча антенны  $0,5^\circ$ . Есть участки, где время синтеза резко возрастает из-за снижения тангенциальной скорости относительного движения.

Для детального анализа процессов в аномальных точках РСА на ГСХО следует использовать методику моделирования, изложенную в разделе 5.5, задавая географические координаты точек в окрестностях аномалии. Можно показать (см. также формулу (5.66)), что ширина спектра сигналов, попадающих в луч антенны в районе аномальной точки, примерно такая же, как и на всем маршруте, что соответствует аналогии с гармоническим анализом ЛЧМ-сигнала. При диаметрально противоположном положении КА скорость разворота луча возрастает, и время синтеза в маршрутном режиме уменьшается.

В общем случае в процессе радиолокационного обзора должна обеспечиваться ориентация строительных осей КА (и соответственно осей антенны РСА) в пространстве по курсу, крену и тангажу. При фиксированном положении полосы съемки относительно трассы КА (Seasat-A, ERS-1, ERS-2) вертикальную ось КА направляют в зенит (нулевой угол тангажа), поперечную ось КА – в горизонтальном направлении (нулевой угол крена), а продольную ось КА (курсовой угол) – вдоль вектора скорости: орбитальной (ориентация в ОСК) или путевой (ориентация в ПСК). Для изменения положения полосы съемки относительно трассы КА возможен разворот КА по крену КА (РСА «Меч-К», «Меч-КУ») или сканирование ДНА по углу места.

#### **5.6.4. Масштабы радиолокационного изображения**

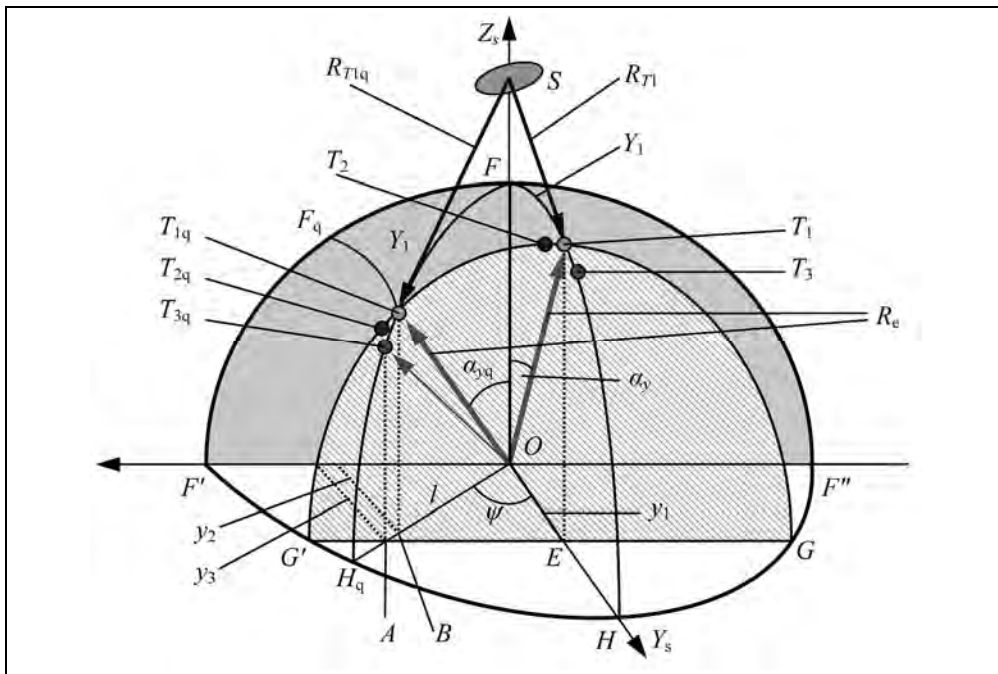
Полученные формулы для тангенциальной и радиальной составляющих скорости относительного движения позволяют вычислить масштабы получаемого радиолокационного изображения по координатам вдоль и поперек линии пути КА. В общем случае имеем скошенный обзор, обусловленный отклонениями от строго бокового обзора в гринвичской системе координат, которые вызваны явлениями систематического характера (управление в ОСК, эллиптичность орбиты или заданный режим скошенного обзора), а также ошибками ориентации КА.

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

Рассмотрим сначала случай строго бокового обзора при движении КА по круговой орбите относительно сферы, аппроксимирующей геоид. Геометрия обзора показана на рис. 5.16. Пусть в момент «медленного» времени  $t_{X1} = 0$  (положение КА в точке  $S$ ) наблюдается некоторая точка  $T_1$  (опорная), удаленная от трассы КА на расстояние  $Y_1$  по дуге большого круга (центральный угол  $\alpha_{y1}$ ). «Быстрое» время опорной точки определится ее наклонной дальностью согласно формулам (3.4)–(3.8), приведенным в разделе 3.1

$$t_{R1} = \frac{2R_1}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos \alpha_y}, \quad (5.80)$$

где  $R_s$  – радиус орбиты КА;  $R_e$  – локальный радиус Земли;  $\alpha_y = Y_1/R_e$  – центральный угол опорной точки.



**Рис. 5.16.** Геометрия бокового и скошенного обзоров:  
 $F'FF''$  – след КА;  $GG'$  – геометрическое место точек, удаленных от следа КА на  $Y_1$   
 (плоскости визирования:  $OST_1H$  – при боковом обзоре,  $OST_{1q}B_q$  – при скошенном обзоре)

Зададим еще две точки, точку  $T_2$ , смещенную по «медленному» времени на период повторения зондирующего сигнала  $T_p$ :  $t_{X2} = t_{X1} + T_p$ , и точку  $T_3$ , смещенную по «быстрому» времени на период дискретизации принимаемого сигнала  $T_s = 1/F_s$ , где  $F_s$  – частота квантования. Ее временная задержка будет равна  $t_{R3} = t_{R1} + T_s$ .

Масштаб РЛИ вдоль линии пути КА определится путевой скоростью относительного движения  $V_{sg}$ , являющейся модулем векторной суммы тангенциальной (5.76) и радиальной (5.71) составляющих скорости относительного движения. Этот

случай аналогичен движению самолетного РСА с суммой воздушной скорости и скорости ветра, когда луч антенны РСА направлен по нормали к вектору путевой скорости. После преобразований формул (5.71), (5.76) с учетом (5.72) приходим к формуле для угловой скорости относительного движения (5.70), откуда получаем формулу для масштаба (шага пикселей) РЛИ вдоль линии пути:

$$M_X = T_p V_g = T_p \omega_{sg} R_e \cos \alpha_y. \quad (5.81)$$

Для прожекторного режима вместо  $T_p$  следует брать интервал между интерполированными отсчетами, соответствующими временной дискретизации пикселей выходного РЛИ. В режиме Скансар следует учитывать выполняемую обычно децимацию (прореживание) выходных отсчетов.

Выражение для масштаба поперек линии пути следует из (3.4)–(3.8) раздела 3.1

$$M_Y = \frac{c}{2}(t_{R3} - t_{R1}) = \frac{cT_s}{2 \sin \gamma_i}, \quad (5.82)$$

где  $T_s$  – такт квантования сигнала в АЦП;  $\gamma_i$  – угол падения, равный

$$\gamma_i = \arcsin \left\{ \frac{R_s}{R_l} \sin \alpha_y \right\} = \arcsin \left\{ \frac{R_s}{R_l} \sin \left( \frac{Y_1}{R_e} \right) \right\}. \quad (5.83)$$

Для скошенного обзора, когда плоскость визирования  $OST_{1q}H_q$  повернута относительно нормали к вектору путевой скорости КА на угол  $\psi$ , рассматриваем точки  $T_{1q}$ ,  $T_{2q}$ ,  $T_{3q}$  на рисунке. Выражение для масштаба вдоль линии пути КА не изменится (5.81), так как след луча движется по той же траектории.

Переход к скошенному обзору приводит к возрастанию наклонной дальности целей, удаленных от следа КА на расстояние  $Y_1$ . Из геометрии, приведенной на рис. 5.16, имеем основные соотношения, связывающие центральный угол  $\alpha_{yq}$  с углом поворота  $\psi$  плоскости визирования:

проекция дуги  $FT_1=Y_1$  на горизонтальную плоскость

$$OE = y_1 = R_e \sin \alpha_y; \quad (5.84)$$

проекция дуги  $FT_{1q}$  на горизонтальную плоскость после поворота плоскости визирования

$$OB = l = y_1 / \cos \psi = R_e \sin \alpha_y / \cos \psi; \quad (5.85)$$

центральный угол точки  $T_{1q}$

$$\alpha_{yq} = \arcsin(l/R_e) = \arcsin(\sin \alpha_y / \cos \psi). \quad (5.86)$$

Наклонная дальность точки  $T_{1c}$  определится известной формулой

$$R_{1q} = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos \alpha_{yq}}. \quad (5.87)$$

Наклонная дальность точки  $T_{3q}$

$$R_{3q} = R_{1q} + cT_s/2. \quad (5.88)$$

Первичное РЛИ в косоугольных координатах азимут–наклонная дальность в плоскости визирования (до преобразования РЛИ в прямоугольную систему коор-

динат) имеет масштаб по наклонной дальности, который определяется формулой (5.83) с подстановкой в нее  $R_1=R_{1q}$  из формулы (5.88).

При скошенном обзоре смещение точки вдоль плоскости визирования (по наклонной дальности) проектируется вдоль и поперек линии пути. Значения проекций можно найти путем решения прямоугольного сферического треугольника  $FF_qT_{1q}$  по гипотенузе  $FT_{1q}$  и углу при вершине, равному  $\angle F=\pi/2-\psi$ . Как и следовало ожидать, дуга  $F_qT_{1q}$ , характеризующая расстояние точки  $T_{1q}$  от следа КА, равна

$$F_qT_{1q} = R_e \arcsin \left\{ \sin \alpha_{yq} \cos \psi \right\} = Y_1. \quad (5.89)$$

Для точки  $T_{3q}$  длина дуги  $FT_{3q}$ , равная расстоянию  $Y_3$  от следа КА (на рисунке не показана), определяется формулой, где  $\sin \gamma_{iq} = (R_s \sin \alpha_{yq}) / R_{T1q}$

$$Y_3 = R_e \arcsin \left\{ \sin \left( \alpha_{yq} + \frac{cT_s}{2R_e \sin \gamma_{iq}} \right) \cos \psi \right\} \approx R_e \arcsin \left\{ \sin \alpha_{yq} \cos \psi + \frac{cT_s \cos \psi}{2R_e \sin \gamma_{iq}} \cos \alpha_{yq} \right\}. \quad (5.90)$$

Разлагая арксинус в степенной ряд и учитывая малость приращения наклонной дальности, получаем после преобразований формулу масштаба РЛИ поперек линии пути для скошенного режима обзора

$$M_Y = \frac{cT_s \cos \alpha_{yq} \cos \psi}{2 \sin \gamma_{iq} \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{yq} \cos^2 \psi}}. \quad (5.91)$$

Аналогично из треугольника  $FF_qT_{1q}$  вычисляем время упреждения при наблюдении цели в скошенном (переднебоковом) режиме обзора и азимутальное смещение отметки на РЛИ по отношению к боковому обзору

$$t_{1q} = \arctg \left\{ \operatorname{tg} \alpha_{yq} \sin \psi \right\} / \omega_{sg}; \quad (5.92)$$

$$\Delta X_q = R_e \cos \alpha_y \arctg \left\{ \operatorname{tg} \alpha_{yq} \sin \psi \right\}.$$

Вычисленные значения масштабов и азимутальное смещение при косоугольном обзоре используются в процедурах геокодирования РЛИ с преобразованием в равномасштабную плановую проекцию и другие картографические проекции.

### **5.6.5. Ширина спектра доплеровских частот принимаемого сигнала**

Из геометрии, представленной на рис. 5.7, следует, что в канал с дальностью  $R_0$  кроме сигнала от цели  $T$  будут попадать сигналы от целей, расположенных по окружности с радиусом  $R_e \sin \alpha_y$  на Земле в пределах ширины азимутальной ДНА  $\alpha_{xant}$  (или зоны облучаемой антенной на земной поверхности  $X_{ant}$ ). Ввиду малости угла  $\alpha_{xant}$  можно пренебречь различием между хордами  $T_1T_2$  и соответствующими дугами с центрами  $S$  и  $O'$  на рис. 5.17, а также отличием наклонной дальности  $R$  и  $R_0$ .

С учетом принятых допущений получаем соотношение между углом поворота плоскости визирования  $\Delta \psi_v$  и угловым размером ДНА  $\alpha_{ant}$

$$R_e \sin \alpha_y \sin \Delta \psi_v \approx R_0 \sin (\alpha_{ant} / 2). \quad (5.93)$$

Откуда имеем соотношения для приращения разворота плоскости визирования и для ее крайних положений в пределах азимутальной ДНА

$$\Delta\psi_v = \arcsin\left(\frac{R_0 \sin(\alpha_{\text{xant}}/2)}{R_e \sin\alpha_y}\right);$$

$$\psi_{v1,2} = \psi_v \mp \Delta\psi_v. \quad (5.94)$$

Подставляя полученные углы в формулу (5.70), вычисляем значения радиальных скоростей на краях ДНА и ширину спектра доплеровских частот принимаемых сигналов

$$\Delta F_{\text{Доп}} = \frac{2|V_r(\psi_{v2}) - V_r(\psi_{v1})|}{\lambda}. \quad (5.95)$$

В результате приходим к известному соотношению  $\Delta F_{\text{Доп}} = 2V_{\text{sg}}/D_{\text{лант}}$ .

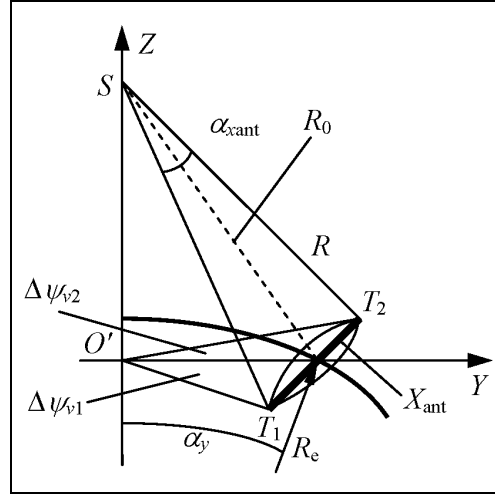


Рис. 5.17. Связь между угловым размером ДНА и углом разворота плоскости визирования

### 5.6.6. Временной закон изменения наклонной дальности точки визирования. Разрешение РСА по азимуту

Проанализируем геометрию относительного движения точки визирования, показанную на рис. 5.13, з. В рассматриваемой модели с орбитальным движением, отнесенным к земной поверхности (кроме вертикальной скорости, вызванной эллиптичностью орбиты), координаты КА характеризуются вектором

$$\mathbf{R}_s(t) = \{0\mathbf{x}_v + 0\mathbf{y}_v + (R_s + V_{Hs}t)\mathbf{z}_v\}. \quad (5.96)$$

Вектор наклонной дальности  $\mathbf{R}(t)$  в пределах малых углов отклонения, когда результаты вращений можно складывать независимо, определится умноженными на время суммой составляющих угловых скоростей  $\omega_{Xv}$ ,  $\omega_{Yv}$ ,  $\omega_{Zv}$  и проекций радиус-вектора точки визирования на плоскости, нормальные к осям вращения

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{R}_T(t) - \mathbf{R}_s(t) = R_e(\cos\alpha_y \sin\omega_{Yv}t - \sin\alpha_y \sin\omega_{Zv}t)\mathbf{x}_v + R_e(\sin\alpha_y - \sin\omega_{Xv}t \cos\alpha_y)\mathbf{y}_v + (R_s + V_{Hs}t - R_e(\cos\alpha_y - \sin\alpha_y \sin\omega_{Yv}t))\mathbf{z}_v. \quad (5.97)$$

Временная зависимость модуля наклонной дальности для эллиптической орбиты при строго боковом обзоре определяется формулой

$$\mathbf{R}(t) = \left\{ R_e^2(\cos\alpha_y \sin\omega_{Yv}t - \sin\alpha_y \sin\omega_{Zv}t)^2 + R_e^2(\sin\alpha_y - \sin\omega_{Xv}t \cos\alpha_y)^2 + (R_s + V_{Hs}t - R_e(\cos\alpha_y + \sin\alpha_y \sin\omega_{Yv}t))^2 \right\}^{1/2}. \quad (5.98)$$

Как и в разделе 5.4, заменим орбитальное движение приближенно прямолинейным с линейной эквивалентной скоростью (ЛЭС)  $V_{le}$ , для которой на наклонной



дальности  $R_0$  скорость азимутальной ЛЧМ совпадает со скоростью ЛЧМ орбитального движения

$$V_{le} = \sqrt{\ddot{R}(t) \cdot R_0} = \sqrt{2C_2 R_0}, \quad (5.99)$$

где  $\ddot{R}(t) = d^2 R(t)/dt^2$  – вторая производная наклонной дальности цели по времени;  $C_2$  – коэффициент разложения временной зависимости наклонной дальности в степенной ряд, определяющий скорость азимутальной ЛЧМ принимаемого сигнала от цели.

Значения ЛЭС  $V_{le}$ , а также времени минимальной дальности  $t_{nr}$ , радиальной скорости  $V_r$  при  $t=0$  и минимальной наклонной дальности цели  $R_{nr}$  при расчете параметров движения можно выразить через отсчеты модуля наклонной дальности и гринвичских координат спутника

$$V_{le} = \sqrt{\frac{R(-h)^2 + R(h)^2 - 2R(0)^2}{2h^2}}, \quad (5.100)$$

$$t_{nr} = \frac{R(h)^2 - R(-h)^2}{4V_{le}^2 h}, \quad (5.101)$$

$$V_r(0) = \frac{V_{le}^2 t_{nr}}{R(0)}, \quad (5.102)$$

$$R_{nr} = \sqrt{R(0)^2 - V_{le}^2 t_{nr}^2}. \quad (5.103)$$

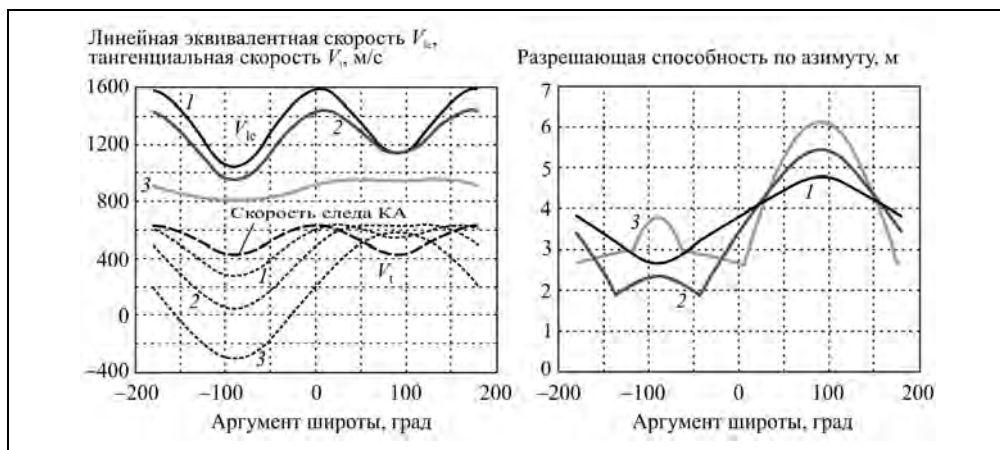
Здесь  $h$  – шаг временных отсчетов наклонной дальности.

Используя полученные выражения, найдем значение разрешающей способности РСА по азимуту по известным формулам прямолинейного движения (см. табл. 5.2) с учетом вычисленного ранее значения времени синтеза для орбитального движения

$$\rho_x = \frac{R_0 \lambda}{2V_{le} T_{synt}} = \frac{D_{xant}}{2M_{le}}. \quad (5.104)$$

На рис. 5.18 приведены графики зависимостей линейной эквивалентной скорости, тангенциальной составляющей скорости и разрешения по азимуту, реализуемого в маршрутном режиме, от аргумента широты КА для РСА на ГСхО (горизонтальный размер антенны равен 20 м, угол наклона орбиты  $85^\circ$ , время синтеза ограничено значением 800 с).

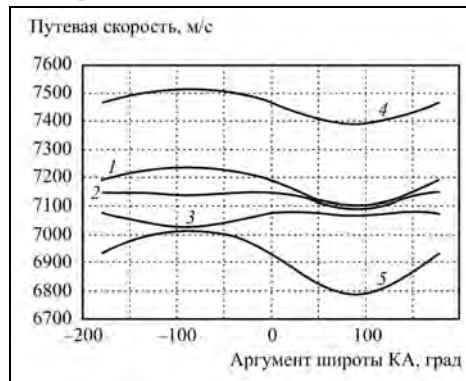
Характерно, что значения тангенциальной скорости (и скорость следа КА) значительно меньше значений линейной эквивалентной скорости, которая учитывает также изменения радиальной скорости при смещении от нуля. Как было ранее отмечено в разделе 5.2, из-за вращательного движения КА реализуемое в маршрутном режиме разрешение по азимуту может быть значительно лучше, чем половина горизонтального размера антенны  $D_{xant}/2$ .



**Рис. 5.18.** Графики зависимости от аргумента широты КА для РСА на ГСХО: слева – для линейной эквивалентной скорости (сплошные линии) и для тангенциальной составляющей (пунктир): углы падения 20° (1), 45° (2) и 80° (3); справа – кривые для разрешающей способности по азимуту (максимальное время синтеза 800 с; угол наклона орбиты 85°)

### 5.6.7. Сравнение Кеплерова движения с возмущенным движением КА

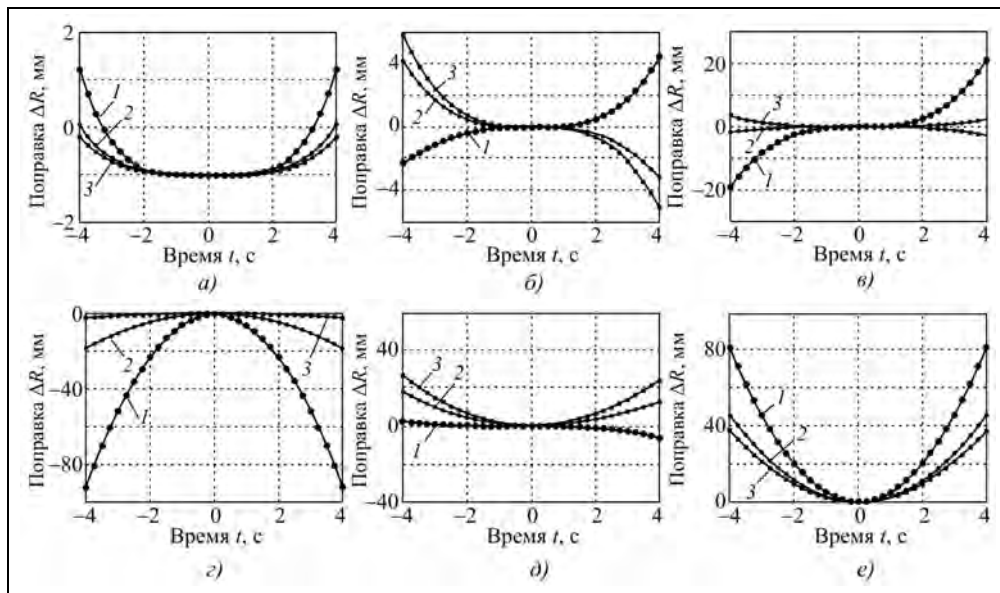
Для сравнения параметров траекторного сигнала при возмущенном движении КА и модели его движения по Кеплеровой орбите проведено моделирование [159\*]. Параметры моделирования приведены в табл. 5.4. Высота орбиты около 500 км. Результаты моделирования приведены на рис. 5.19, где показаны графики зависимостей ЛЭС от аргумента широты КА для трех дальностей 580, 1180 и 1780 км, соответственно 1, 2, 3, а также значения путевых скоростей спутника 4 и следа 5. В отличие от прямолинейного движения значения ЛЭС меняются с изменением наклонной дальности, а также высоты рельефа наблюдаемой местности. Это приводит к различию законов ЛЧМ. Указанные различия необходимо учитывать в алгоритмах синтеза изображения с высоким разрешением.



**Рис. 5.19.** Зависимости скоростей относительного движения от аргумента широты КА

На рис. 5.20 приведены графики для остаточных погрешностей временного закона наклонной дальности цели при аппроксимации возмущенного движения спутника прямолинейным движением с ЛЭС и Кеплеровым движением. Заметим, что эти графики относятся к орбитам с эксцентриситетом 0,008, при котором перепад высот орбиты составляет  $\pm 54$  км. Снижение перепада высот до  $\pm 21$  км ( $e_0 = 0,003$ ), что более типично для космических РСА, приводит к уменьшению остаточных погрешностей до  $\pm 8,2$  мм.

**Радиолокационные системы землебзора космического базирования**



**Рис. 5.20.** Остаточные поправки для прямолинейной модели (а, б, в) и Кеплеровой аппроксимации (з, д, е) возмущенного движения спутника при истинной аномалии  $\theta_0=0^\circ$  (а, з),  $\theta_0=45^\circ$  (рисунки б, д) и  $\theta_0=90^\circ$  (в, е); наклонные дальности цели  $R_0=580$  км (кривые 1),  $R_0=1180$  км (кривые 2),  $R_0=1780$  км (кривые 3)

**Таблица 5.4. Параметры моделирования**

Параметр	Значение
Большая полуось орбиты	$a_0=6871$ км
Эксцентриситет орбиты	$e_0=0,008$
Угол наклона орбиты	$i_0=70^\circ$
Долгота узла	$\lambda_{s0}=0$
Аргумент перигея	$\theta_{op}=-90^\circ$
Аргумент широты спутника	$\theta_s=-90^\circ, -45^\circ, 0^\circ$
Истинная аномалия	$\theta_0=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$
Средняя высота орбиты	$H_s=500$ км
Наклонные дальности	$R_0=580/1180/1780$ км

Для расчета параметров опорной функции по всем наклонным дальностям необходимо также знание закона изменения ЛЭС по наклонной дальности. Такая зависимость может быть рассчитана на основе данных движения спутника по дискретному числу опорных наклонных дальностей (3...5 в пределах полосы съемки). Графики изменения ЛЭС по наклонной дальности для разных значений истинной аномалии приведены на рис. 5.21. Как видно, характер графиков существенно зависит от аргумента широты спутника или величины истинной аномалии.

Рассмотренная модель относительного движения и проведенные на ее основе расчеты показывают, что движение платформы в окрестностях опорной точки наблюдения может рассматриваться как прямолинейное, имеющее скорость, которая рассчитывается по параметрам возмущенного движения КА. Приведенные аналитические формулы можно использовать для вычисления опорных функций сигнала с интерполяцией параметров движения, вычисленных в дискретных точках (для начальной, центральной, конечных дальностей и промежуточных точек). Для РСА высокого разрешения модель кеплерова движения платформы требует уточнения по расчетам возмущенного движения, а также по информации от аппаратуры позиционирования (ГЛОНАСС, GPS, Galileo), устанавливаемых на КА.

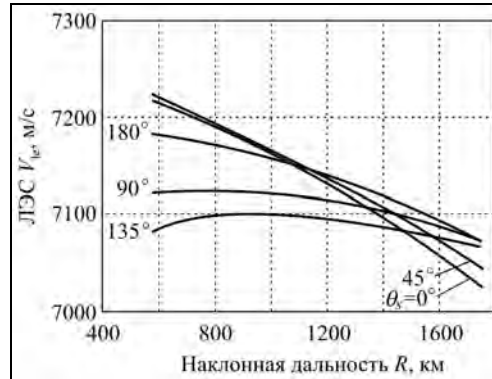


Рис. 5.21. Зависимость ЛЭС от наклонной дальности при разных значениях истинной аномалии спутника

### 5.7. Связь между углами ориентации КА и направлением визирования

Как следует из предыдущих разделов данной главы, при заданных в программе полета параметрах радиолокационного обзора на вход приемного устройства РСА будут поступать сигналы, отраженные от местности в пределах следа ДНА, показанного на рис. 5.7. В задаче получения радиолокационного изображения с высоким разрешением нужно рассматривать элементарные цели, сигналы от которых в момент времени  $t = 0$  попадают в след ДНА и в определенные дальностные каналы. Временные законы изменения текущей дальности каждой цели индивидуальны, в зависимости от положения цели по азимуту, как это показано на рис. 5.22, и это проявляется в изменениях фазы принятого сигнала и миграции дальности, которые надо учитывать при синтезе РЛИ.

Поддержание ДНА в требуемом положении по азимуту и углу места является задачей ориентации КА. В общем случае направление луча антенны относительно вектора скорости КА  $V$  определяется установкой луча антенны относительно осей КА и разворотами

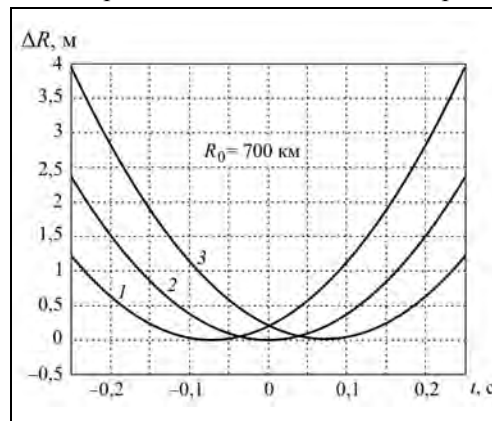


Рис. 5.22. Временные законы изменения дальности целей 1, 2, 3, смещенных по азимуту на 500 м (высота орбиты 500 км, наклонная дальность  $R_0=700$  км)

КА по трем углам – по курсу  $\psi_s$ , тангажу  $\mathcal{G}_s$  и крену  $\gamma_s$  относительно путевой системы координат (ПСК), принятой за опорную систему.

В известной литературе по радиолокации и космическим системам обозначения осей, принятые для описания космических (или летательных) аппаратов, отличаются от принятых в радиолокации. Положение осей космического аппарата опи-

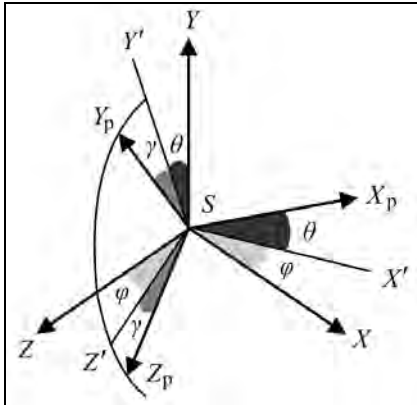


Рис. 5.23. Опорная (SXYZ) и связанная (SX<sub>p</sub>Y<sub>p</sub>Z<sub>p</sub>) системы координат

сываем в представленных на рис. 5.23 связанной с КА подвижной опорной системе координат SXYZ и в связанной системе координатных осей платформы (космического аппарата) SX<sub>p</sub>Y<sub>p</sub>Z<sub>p</sub> [95, 221], начало которой находится в центре масс КА, ось SX<sub>p</sub> направлена вдоль продольной оси КА, ось SY<sub>p</sub> направлена вверх, ось SZ<sub>p</sub> направлена вбок, дополняя систему до правой.

Опорная система координат SXYZ имеет начало в центре масс КА (как правило, близко к фазовому центру антенны), ось X направлена вдоль вектора путевой скорости, ось Y – вертикально вверх, ось Z при левостороннем обзоре направлена по левому борту, обра-

зую правую систему координат, а при правостороннем обзоре направлена по правому борту, образуя левую систему координат. Курсовой угол вектора скорости относительно направления на Север отсчитывается от меридиана по часовой стрелке. Опорная система SXYZ может быть получена из показанной на рис. 5.13,  $\mathcal{z}$  геоцентрической системы радиолокационного обзора OX<sub>v</sub>Y<sub>v</sub>Z<sub>v</sub> путем перемещения начала координат по OZ<sub>sg</sub> в центр масс КА.

Положение системы координат КА SX<sub>p</sub>Y<sub>p</sub>Z<sub>p</sub> относительно опорной SXYZ определяется тремя углами  $\mathcal{G}$ ,  $\psi$ ,  $\gamma$ . Угол  $\mathcal{G}$  между осью SX<sub>p</sub> и горизонтальной плоскостью SXZ – *угол тангажа*, угол  $\psi$  между проекцией оси SX<sub>p</sub> на горизонтальную плоскость SXY (промежуточная ось SX' на рис. 5.23) и осью SX – *угол рысканья* или *угол курса*, угол  $\gamma$  между осью SY<sub>p</sub> и вертикальной плоскостью SXY – *угол крена* или *угол вращения*. Положительным направлением отсчета углов принимается направление против хода часовой стрелки для наблюдателя, смотрящего с конца оси вращения. Заметим, что оси вращения по курсу и тангажу не совпадают с физическими осями КА (вертикальной и поперечной), приближаясь к ним при малых значениях углов отклонения.

Для перехода от опорной системы координат к системе координат КА можно использовать матрицу, определяющую последовательные повороты по курсу относительно оси Y, тангажу относительно оси Z и крену относительно оси X

$$\|A^{X_p \leftarrow X}\| = \|\varphi Y\| \times \|\mathcal{G} Z\| \times \|\gamma X\| = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix}, \quad (5.105)$$

где  $\|\varphi Y\|, \|\vartheta Z\|, \|\gamma X\|$  – матрицы поворотов по соответствующим осям;  $c_{ij}$  – коэффициенты матрицы  $A^{X_p \leftarrow X}$ .

В соответствии с формулами аналитической геометрии прямое и обратное преобразования можно записать в векторной форме [95]

$$\begin{cases} \mathbf{x}_p = c_{11}\mathbf{x} + c_{12}\mathbf{y} + c_{13}\mathbf{z} \\ \mathbf{y}_p = c_{21}\mathbf{x} + c_{22}\mathbf{y} + c_{23}\mathbf{z} \\ \mathbf{z}_p = c_{31}\mathbf{x} + c_{32}\mathbf{y} + c_{33}\mathbf{z} \end{cases} \quad (5.106)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x} = c_{11}\mathbf{x}_p + c_{21}\mathbf{y}_p + c_{31}\mathbf{z}_p \\ \mathbf{y} = c_{12}\mathbf{x}_p + c_{22}\mathbf{y}_p + c_{32}\mathbf{z}_p \\ \mathbf{z} = c_{13}\mathbf{x}_p + c_{23}\mathbf{y}_p + c_{33}\mathbf{z}_p \end{cases} \quad (5.107)$$

или в матричном виде

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{y}_p \\ \mathbf{z}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{pmatrix}, \quad (5.108)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{y}_p \\ \mathbf{z}_p \end{pmatrix}. \quad (5.109)$$

Из геометрии, представленной на рис. 5.24, вычислим направляющие косинусы системы при повороте из опорной системы  $SXYZ$  в промежуточные системы  $SX'YZ'$  (поворот по курсу) и  $SX_pY'Z'$  (поворот по тангажу), а затем и в систему координат КА  $SX_pY_pZ_p$  (поворот по крену). Опорная система в векторной форме определяется ортами  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ .

Переход к промежуточным осям  $\bar{X}', \bar{Y}', \bar{Z}'$  определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \mathbf{X}' &= \mathbf{x} \cos \psi - \mathbf{z} \sin \psi ; \\ \mathbf{Y}' &= -\mathbf{X}' \sin \vartheta + \mathbf{y} \cos \vartheta = -\mathbf{x} \cos \psi \sin \vartheta + \mathbf{y} \cos \vartheta + \mathbf{z} \sin \psi \sin \vartheta ; \\ \mathbf{Z}' &= \mathbf{x} \sin \psi + \mathbf{z} \cos \psi . \end{aligned} \quad (5.110)$$

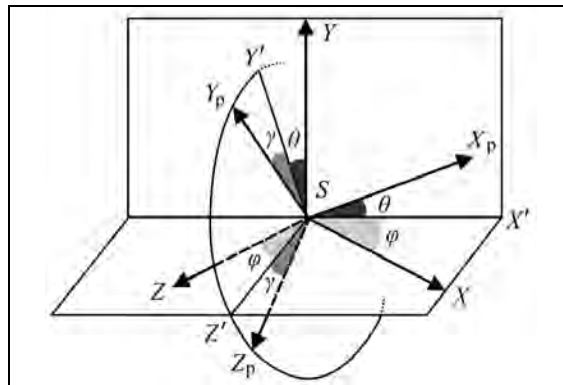


Рис. 5.24. Преобразования координат при повороте осей

Координаты осей КА

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_p &= \mathbf{X}' \cos \vartheta + \mathbf{y} \sin \vartheta; \\ \mathbf{Y}_p &= \mathbf{Y}' \cos \gamma + \mathbf{Z}' \sin \gamma; \\ \mathbf{Z}_p &= -\mathbf{Y}' \sin \gamma + \mathbf{Z}' \cos \gamma. \end{aligned} \quad (5.111)$$

Окончательно получим выражения для осей связанной системы

$$\begin{aligned} X_p &= \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ c_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \\ -\sin \psi \sin \vartheta \end{pmatrix}; \\ Y_p &= \begin{pmatrix} c_{21} \\ c_{22} \\ c_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \psi \cdot \sin \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma \\ \cos \vartheta \cos \gamma \\ \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma \end{pmatrix}; \\ Z_p &= \begin{pmatrix} c_{31} \\ c_{32} \\ c_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma \\ -\cos \vartheta \sin \gamma \\ \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5.112)$$

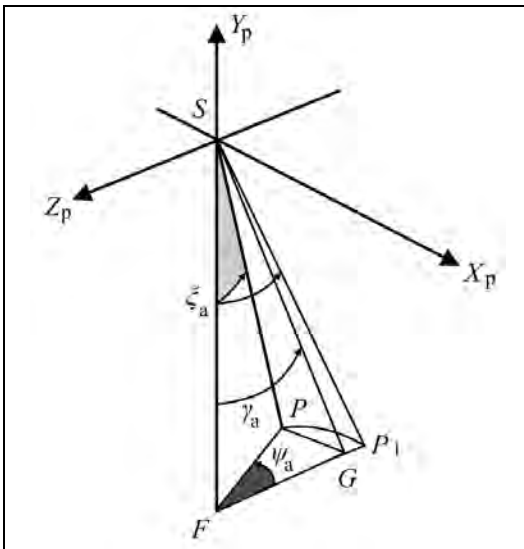


Рис. 5.25. Положение линии визирования  $SP_1$

Применим полученные формулы для вычисления координат точки визирования при наличии ошибок ориентации КА. Сначала рассмотрим важный частный случай, когда луч антенны находится в плоскости, нормальной продольной оси КА (боковой обзор). Примем, что антенна установлена на левом борту КА, луч  $SP_1$  направлен вниз и отклонен от вертикали  $SF$  на угол  $\xi_a$ , как это показано на рис. 5.25. Расстоянием между центром масс КА и фазовым центром антенны пренебрежем.

Вектор линии визирования  $\mathbf{R}$  в центре антенного луча (точка  $P_1$ ) определяется проекциями в связанной системе координат (орты  $\mathbf{x}_p, \mathbf{y}_p, \mathbf{z}_p$ )

$$\mathbf{R} = R_0 (\mathbf{x}_p 0 - \mathbf{y}_p \cos \xi_a - \mathbf{z}_p \sin \xi_a), \quad (5.113)$$

где  $R_0$  – наклонная дальность точки на земной поверхности в центре луча. Значение  $R_0$  вычисляют решением треугольника  $OST$  (см. рис. 5.13,з) по известным па-

параметрам  $R_s$ ,  $\gamma$  и локальному радиусу  $R_e$  в ее сечении плоскостью  $OSY$ , проходящей через ось ДНА.

Координаты центра луча в подвижной опорной системе координат  $SX_pY_pZ_p$  при наличии ошибок ориентации осей КА находим преобразованием

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{pmatrix} = A^{X_p \leftarrow X} \times \begin{pmatrix} X_{Rp} \\ Y_{Rp} \\ Z_{Rp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11}X_{Rp} + c_{21}Y_{Rp} + c_{31}Z_{Rp} \\ c_{12}X_{Rp} + c_{22}Y_{Rp} + c_{32}Z_{Rp} \\ c_{13}X_{Rp} + c_{23}Y_{Rp} + c_{33}Z_{Rp} \end{pmatrix}, \quad (5.114)$$

Откуда составляющие вектора  $\mathbf{R}$

$$\mathbf{R} = R_0 \begin{pmatrix} -\sin \psi \sin(\xi_a + \gamma_a) + \cos \psi \sin \vartheta \cos(\xi_a + \gamma_a) \\ -\cos \vartheta \cos(\xi_a + \gamma_a) \\ -\cos \psi \sin(\xi_a + \gamma_a) - \sin \psi \sin \vartheta \cos(\xi_a + \gamma_a) \end{pmatrix}. \quad (5.115)$$

В более общем случае плоскость луча может быть повернута из положения по нормали к продольной оси КА  $SFP_1$  на угол  $\psi_a$  по курсу в положение  $SFP$ . Тогда проекции вектора линии визирования  $\mathbf{R}$  в центре луча (точка  $P$ ) в связанной системе определяются формулой

$$\mathbf{R} = R_0 \left( -\mathbf{x}_p \sin \xi_a \sin \psi_a - \mathbf{y}_p \cos \xi_a - \mathbf{z}_p \sin \xi_a \cos \psi_a \right). \quad (5.116)$$

В частном случае поворота КА только по курсу имеем

$$\mathbf{R} = R_0 \begin{pmatrix} -\sin \xi_a \sin(\psi_a + \psi) \\ -\cos \xi_a \\ -\sin \xi_a \cos \psi_a \cos \psi \end{pmatrix}. \quad (5.117)$$

В общем случае при произвольных углах ориентации КА составляющие вектора центра луча  $\mathbf{R} = X_R \cdot \mathbf{x}_p + Y_R \cdot \mathbf{y}_p + Z_R \cdot \mathbf{z}_p$  выражаются формулами

$$\begin{aligned} X_R &= R \left( -\sin \xi_a \sin \psi_a \cos \psi \cos \vartheta - \cos \xi_a \sin \psi \sin \gamma_a + \cos \xi_a \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma_a - \right. \\ &\quad \left. -\sin \xi_a \cos \psi_a \sin \psi \cos \gamma_a - \sin \xi_a \cos \psi_a \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma_a \right); \\ Y_R &= R \left( \sin \xi_a \sin \psi_a \sin \vartheta - \cos \xi_a \cos \vartheta \sin \gamma_a + \sin \xi_a \cos \psi_a \cos \vartheta \sin \gamma_a \right); \\ Z_R &= R \left( \sin \xi_a \sin \psi_a \sin \psi \sin \vartheta - \cos \xi_a \cos \psi \sin \gamma_a - \cos \xi_a \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma_a - \right. \\ &\quad \left. -\sin \xi_a \cos \psi_a \cos \psi \cos \gamma_a + \sin \xi_a \cos \psi_a \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma_a \right). \end{aligned} \quad (5.118)$$

Приведенные формулы будут использованы в следующем разделе, в котором рассматривается влияние выбора системы ориентации КА на доплеровскую частоту сигнала, принимаемого антенной РСА. Она зависит от значения радиальной скорости относительного движения в направлении, соответствующем максимуму ДНА,  $F_{Dop} = 2V_r/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны РСА.



### 5.8. Влияние ориентации космического аппарата на радиальную скорость относительного движения

Средняя доплеровская частота, на которой происходит синтез апертуры, определяется положением луча антенны по азимуту относительно нормали к вектору путевой скорости. Факторами, влияющими на значение доплеровской частоты, являются вращение Земли при ориентации осей КА в орбитальной системе координат, углы установки антенны относительно продольной оси КА, а также ошибки ориентации КА.

Для случая ориентации осей КА в ПСК при повороте линии визирования от направления траверза, вызванном ошибками ориентации КА по курсу, тангажу и крену появится поперечная составляющая относительной угловой скорости, линейная компонента которой даст проекцию на линию визирования. Если луч антенны установлен в плоскости, нормальной продольной оси КА, то зависимость радиальной скорости в луче при отклонении КА относительно ПСК определится формулой

$$V_r = \omega_{sg} R_s (\sin \Delta \psi \sin \gamma_a - \cos \Delta \psi \sin \mathcal{G} \cos \gamma_a), \quad (5.119)$$

где  $\Delta \psi$  и  $\mathcal{G}$  – ошибки ориентации КА по курсу и тангажу;  $\gamma_{ant}$  – угол между вертикалью и осью луча ДНА, включая ошибки ориентации КА по крену (знак «плюс» при обзоре левым бортом). Заметим, что положительное значение  $V_r$  соответствует отрицательному смещению доплеровской частоты.

При ориентации осей КА в ОСК имеется сложение двух составляющих — вращения Земли и составляющей, вызванной поворотом КА от ошибок ориентации. Для случая бокового обзора радиальная составляющая скорости определится приближенной формулой

$$V_r \approx -\omega_{ep} R_s \cos \theta_s \sin i_o \sin \gamma_a + \omega_{sg} R_s (\sin \psi_0 \sin \gamma_a - \sin \mathcal{G} \cos \gamma_a). \quad (5.120)$$

На рис. 5.26 отображены зависимости между выносом полосы съемки  $Y$  и радиальной скоростью  $V_r$  при разных значениях аргумента широты КА. Расчетные значения радиальной скорости соответствуют параметрам РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»:  $S$ -диапазон волн, орбита высотой 300 км с углом наклона  $72^\circ$ . Рассмотрен случай ориентации осей КА в ОСК (в отличие от реализованной в РСА «Меч-КУ» ориентации КА в ПСК). Слева показаны положения следа ДНА на поверхности Земли, справа – совмещенные с ними для наглядности графики радиальных скоростей: они представляют собой как бы вид сверху от КА. По оси ординат отложены значения горизонтальной дальности  $Y$ : вниз для обзора правым бортом и вверх – для обзора левым бортом. По оси абсцисс приведены значения радиальной скорости  $V_r$ , причем отрицательные значения отложены вправо, что соответствует положительным доплеровским смещениям частоты. Аргумент широты (обозначен буквой « $u$ ») дан с шагом  $45^\circ$  в пределах от  $0$  до  $90^\circ$  для рис. 5.26, б, з, е (восходящая ветвь витка). Для нисходящей ветви витка кривые симметричны относительно оси ординат – скорость меняет знак. Для рис. 5.26, ж аргумент широты дан до  $180^\circ$ , кривые для значений аргумента широты  $u = 180-360^\circ$  совпадают с приведенными на рисунке.

Рассмотрены 4 случая – отсутствие ошибок ориентации (рис. 5.26, а и б), поворот на  $1^\circ$  только по курсу (рис. 5.26, в и з), на  $1^\circ$  только по тангажу (рис. 5.26, д и е) и совместное влияние поворотов по курсу и тангажу по  $0,5^\circ$  (рис. 5.26, ж и з).

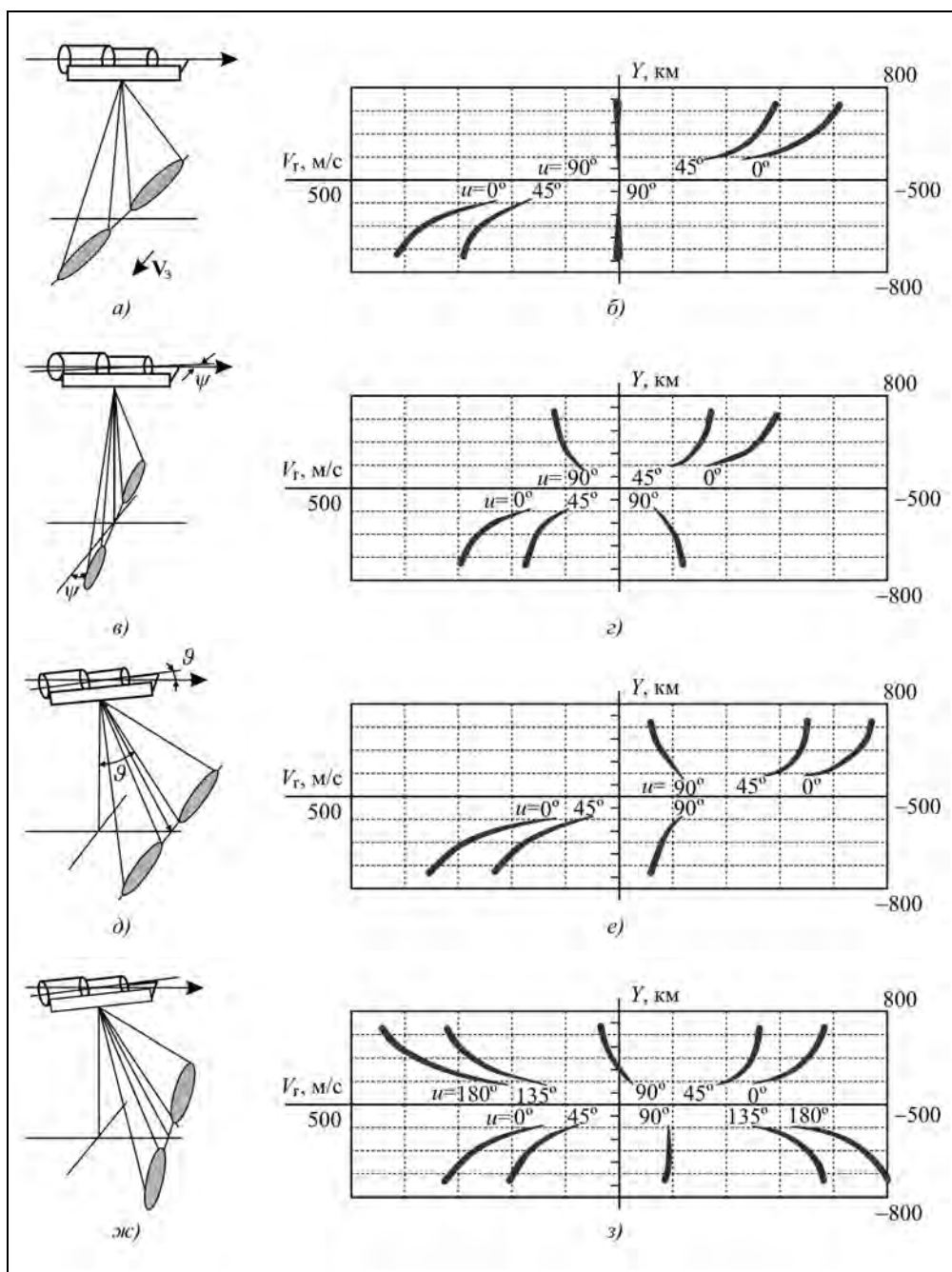


Рис. 5.26. Положения следа ДНА и зависимости радиальных скоростей от горизонтальной дальности  $Y$  (вверх – левый борт, вниз – правый борт) при разных значениях аргумента широты  $u$  (ориентация осей КА в ОСК)

Поведение кривых радиальной скорости для ориентации осей КА в ОСК при аргументе широты  $90$  и  $270^\circ$  совпадает со случаем ориентации осей КА в ПСК (Гринвичской системе координат). Смещение доплеровской частоты от нуля может быть вызвано вертикальной скоростью при орбите, отличающейся от круговой.

Влияние поворотов по курсу и тангажу различно. При повороте КА по курсу плоскость лучей поворачивается относительно вертикали, радиальные скорости при обзоре вправо и влево изменяются в разные стороны.

При повороте по тангажу плоскость лучей перемещается вперед, приводя к одинаковым значениям радиальных скоростей по правому и левому бортам. Путем поворота КА по курсу при произвольном значении аргумента широты можно достичь компенсации радиальной составляющей скорости Земли  $V_T$  – кривая пройдет точно по оси ординат, что соответствует нормали к вектору путевой скорости (нулевому доплеровскому сдвигу), т.е. ориентации в ПСК (как при  $u=90^\circ$  для случая ориентации в ОСК).

Если зона захвата невелика и обзор односторонний, то поворотом КА по курсу можно скомпенсировать ошибки по тангажу (кривая  $u=90^\circ$  для левого борта). Этот способ был использован для устранения ошибок ориентации в РСА «Меч-К» КА «Космос-1870» и «Меч-КУ» КА «Алмаз-1».

Анализ приведенных формул для расчета радиальной скорости (а, значит, и доплеровской частоты в максимуме ДНА), а также данные о практических РСА космического базирования (см. гл. 13) свидетельствует, что при ориентации КА в ОСК смещения доплеровской частоты могут достигать  $10 \dots 15$  кГц, значительно превышая частоту повторения зондирующего сигнала и создавая проблемы устранения помех неоднозначности сигналов по азимуту. Поэтому в современных РСА используют ориентацию КА в ПСК. Должны приниматься меры по уменьшению ошибок ориентации КА до единиц угловых минут, чтобы вызванное ими смещение доплеровской частоты было существенно меньше ширины спектра доплеровской частоты и не вызывало дополнительных сложностей при синтезе РЛИ и коррекции геометрических искажений РЛИ.

### **5.9. Баллистические данные для расчета опорной функции синтеза изображения**

Как уже отмечалось, для формирования опорных функций согласованной фильтрации при синтезе РЛИ необходима баллистическая информация о движении КА. Ее вводят в процессор синтеза РЛИ в виде массива служебной информации, который содержит также сведения о включенном режиме работы, параметрах зондирующего сигнала и т.д. В процессе радиолокационной съемки в программу полета записывают время включения заданного режима работы РСА и его параметры, часть из которых может рассчитываться на борту с учетом имеющейся навигационной информации. Современные РСА используют внешние данные траекторных измерений, а также автономные устройства позиционирования КА (GPS, ГЛОНАСС) и астродатчики для ориентации осей КА. Как правило, точность ориентации КА ниже, чем точность измерения положения осей по астродатчикам. Измеренные поправки должны учитываться в алгоритмах синтеза изображения и привязки его к географическим координатам. Для получения качественного изображения заданного объекта необходимо согласование двух систем управления:

1) системы выбора временного положения строка приема с заданием наклонной дальности первого и последующих отсчетов радиоголограммы и числа отсчетов;

2) системы ориентации осей КА и установки луча антенны по углу места в центр снимаемого участка и по азимуту – в направлении нулевой (или заданной) доплеровской частоты при съемке в маршрутном режиме или в упрежденную точку в прожекторном режиме.

При рассогласовании этих систем, но с учетом соблюдения точного закона изменения фазы при синтезе РЛИ, может происходить снижение яркости изображения без ухудшения его разрешающей способности по азимуту либо появление смещенного изображения из зоны неоднозначности.

В процессе радиолокационной съемки каждый снимаемый кадр (маршрут) должен сопровождаться достаточной служебной информацией для выполнения синтеза радиолокационного изображения (РЛИ), преобразования его в картографические проекции и привязки РЛИ к географическим координатам. Часть этой информации (константы, параметры режимов, форма геоида, геометрия установки антенны на КА и др.) может находиться в архивах (файлах) комплекса обработки радиолокационной информации (КОРЛИ), а оперативные данные – в файле-заголовке, предшествующем радиолокационной информации или в специально отведенных фрагментах строк радиолокационных данных. Такого рода служебная информация должна сопровождать все виды информационных продуктов: первичные («сырые») данные – радиоголограмму и РЛИ – амплитудные, комплексные, геокодированные и т.д. Для упрощения процедур обмена и тематической обработки радиолокационных данных, включая сети Интернета, существуют рекомендации Международной комиссии по дистанционному зондированию СЕОС (Commission on the Earth Observation Systems) [460, 557, 558]. В *состав служебной информации* включающей параметры режима и баллистическую информацию должны входить следующие параметры:

- сглаженные значения текущего положения центра масс КА в гринвичской системе координат (ГСК);
- сглаженные значения текущего вектора скорости центра масс КА в ГСК;
- угловые координаты строительных осей КА  $SX_p, Y_p, Z_p$  относительно подвижной связанной опорной системы координат  $SXYZ$  с центром  $S$  в центре масс КА, осью  $X$ , направленной вдоль вектора путевой скорости в ГСК, осью  $Y$ , направленной в зенит и осью  $Z$ , дополняющей систему до правой;
- координаты центра кадра на поверхности Земли, включая значение локальной высоты рельефа относительно референц-эллипсоида (или значение локального радиуса Земли).

Для получения и практического использования космических РЛИ с метровым разрешением, особенно при интерферометрической обработке группы снимков, необходима совместная географическая привязка РЛИ с погрешностями, соизмеримыми с шагом дискретизации РЛИ. Поэтому требуется очень высокая точность баллистической информации, что достигается внешними траекторными измерениями и установкой на борту КА аппаратуры GPS, как это предусмотрено в PCA TerraSAR-X [315]. В этой аппаратуре первоначальная точность позиционирования составляет 10 м (СКО), а с применением дополнительных средств – 2 или 0,1 м. Для расчета опорной функции

кроме траекторных данных, уточняемых после съемки, проводится дополнительная специальная обработка радиоголограммы. Необходимое сглаживание флуктуаций достигается путем совместной обработки результатов интегрирования уравнений возмущенного движения КА и данных GPS или ГЛОНАСС. Точность измерения положений осей КА с использованием астродатчиков составляет доли угловых минут.

Особенность учета параметров принимаемых сигналов для вычисления опорных функций синтеза РЛИ и географической привязки состоит в том, что ряд из них имеют высокую временную точность, определяемую используемыми эталонами времени. К точным параметрам относятся: период зондирования, частота квантования принимаемого сигнала, величина задержки принятых сигналов в отсчетах с номерами, отсчитываемыми от начала строба приема, время прохождения сигнала от цели минимальной наклонной дальности (эта точка соответствует нулевому значению доплеровской частоты, погрешность измерения которой равна  $1/T_{\text{synt}}$ , где  $T_{\text{synt}}$  – время синтеза апертуры), угловая скорость вращения Земли.

Вычисленные значения географических координат целей поперек трассы КА путем преобразования наклонной дальности в горизонтальную по поверхности Земли включают погрешности вычисления координат следа КА, текущего радиуса орбиты и локальной высоты рельефа в точке наблюдения. На точность вычисления координат целей вдоль трассы КА (по азимуту) влияют погрешности вводимых поправок на компенсацию смещений доплеровской частоты, вызванных вертикальной скоростью при эллиптических орбитах, а также отклонения осей КА от опорной системы координат и погрешности измерений этих отклонений.

Используя приведенные в предыдущих разделах формулы (5.2), (5.3), (5.101), (5.103), по координатам КА (с интерполяцией по вектору скорости) и координатам точки прицеливания вычисляют текущий радиус орбиты КА, локальный радиус Земли, текущую и минимальную наклонные дальности, а также зависимость ЛЭС от наклонной дальности по стробу приема. По этим данным рассчитывают фазовый множитель опорной функции синтеза РЛИ и закон миграции дальности. По углам ориентации осей КА для РСА с АФАР рассчитывают компенсирующие отклонения ДНА для реализации строго бокового обзора или скошенного обзора под заданными углами (включая прожекторный режим). При отсутствии в антенне РСА сканирования по азимуту вычисляют смещение по доплеровской частоте для учета в весовой функции синтеза РЛИ.

По вычисленным данным делают пересчет наклонной дальности в горизонтальную по дуге большого круга на Земле, а по времени прохождения нуля доплеровской частоты с учетом поправки на вертикальную скорость — положение точек РЛИ вдоль линии в плановой проекции и их координаты.

Приведенные в настоящей главе модели движения платформы с РСА, формулы для расчета геометрии космического землеобзора и параметров траекторного сигнала могут быть использованы при проектировании РСА для выбора параметров аппаратуры, получения исходных данных для моделирования алгоритмов синтеза РЛИ и выработке требований к обеспечивающим системам КА по точностям измерения координат КА и угловой ориентации осей КА для проведения радиолокационной съемки.

---

## Глава 6

# АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОСМИЧЕСКИХ РСА

### 6.1. Этапы обработки радиолокационных сигналов и вид информационных продуктов

К настоящему времени общие принципы получения и обработки радиолокационных снимков широко освещены в зарубежной и отечественной литературе, включая журнальные публикации. Конкретная реализация алгоритмов синтеза и первичной обработки РЛИ на рабочих станциях дистрибьюторов радиолокационной информации и в ряде поставляемых программных пакетах обработки данных обеспечивает пользователей необходимым информационным продуктом, но является ноу-хау фирм производителей. В данной главе дается анализ и систематизация основных алгоритмов синтеза комплексных и амплитудных РЛИ. В гл. 7 рассмотрены вопросы последовательной обработки (некогерентного накопления) и отображения РЛИ.

Процесс получения выходного информационного продукта в современных космических РСА включает в себя несколько этапов, часть которых выполняется на борту КА, а остальные – на наземном комплексе приема и обработки радиолокационной информации (НКОРЛИ). Этот комплекс может быть совмещен с пунктом управления полетом и режимами съемки.

Основные этапы преобразования и обработки информации и соответствующие им информационные продукты обычно включают в себя:

1) преобразование аналоговых сигналов с выходов приемника РСА в цифровую форму с использованием методов сжатия потока данных для передачи по радиолинии. Результат – упакованная радиолокационная информация (радиоголограмма) с приложением к ней сопроводительной служебной информации о режимах работы и их параметрах, а также баллистической информации о движении платформы, форматах данных и др.;

2) передачу данных по радиолинии, прием и форматирование данных для последующей обработки;

3) преобразование радиолокационных данных с восстановлением результатов компрессии и коррекцией аппаратурных искажений (амплитудных, частотных, фазовых). В результате этого этапа получают квадратурные составляющие радиоголограммы в стандартных форматах (например, `integer8`, `integer16` или `float32`), а также сопроводительную информацию, по которой рассчитывают опорные функции для синтеза РЛИ;

4) синтез комплексных радиолокационных изображений (КРЛИ) или их фрагментов с коррекцией миграции дальности и автофокусировкой при необходимости;

5) вычисление модуля КРЛИ с получением амплитудного РЛИ (первичные РЛИ в координатах наклонной и путевой дальностей). Радиолокационная информация может предоставляться также в виде цифровых отсчетов мощности, пропорциональных значениям удельной ЭПР в пикселе изображения;

6) некогерентное накопление нескольких независимых наблюдений;

7) привязку первичных РЛИ к географическим координатам (геореференцирование);

8) сборку фрагментов КРЛИ (в частности, для режима Скансар) с приведением масштабов фрагментов к единому масштабу по наклонной и путевой дальностям;

9) преобразование РЛИ к плановой равномасштабной проекции в координатах вдоль и поперек линии пути с коррекцией геометрических и радиометрических искажений (калибровка РЛИ);

10) преобразование РЛИ к картографическим проекциям (геокодирование);

11) специальную обработку радиолокационных изображений – синтез поляриметрических, интерферометрических изображений и др.;

12) тематическую обработку изображений – извлечение информации для потребителей, включая обнаружение и распознавание наземных (надводных) объектов, разведку оперативной обстановки, построение карт рельефа местности, индикацию движущихся целей, измерение подвижек земной коры и изменений геометрии объектов, оценку биомассы растительного покрова, ледовую разведку и контроль судовождения, а также решение задач исследования природных ресурсов, экологического мониторинга суши и морской поверхности, обеспечения поисково-спасательных операций и др.

При анализе алгоритмов синтеза РЛИ будем отдельно рассматривать случаи строго бокового обзора и скошенного обзора.

Примем, что при *боковом обзоре* угловое положение максимума ДНА близко к нулю доплеровской частоты и что ошибки ориентации КА не превышают 1/4 от ширины ДНА. Поэтому проблема неоднозначности по азимуту не возникает, и нет необходимости компенсации средней доплеровской частоты. В этом случае коррекция ошибок ориентации КА для исключения энергетических потерь обеспечивается небольшим смещением максимума амплитудной весовой функции обработки для ее совпадения с максимумом ДНА, а компенсации геометрических ошибок в РЛИ не требуется.

В случае *скошенного обзора* даже при малом скосе, например, в прожекторном режиме съемки, возникает необходимость компенсации циклического смещения азимутальных отсчетов, а также миграции дальности.

Общим принципом получения радиолокационных изображений (РЛИ) в РСА авиационного и космического базирования является согласованная фильтрация принятого сигнала. Параметры сигналов и выходного РЛИ имеют различия в зависимости от режима работы РСА, что приводит к необходимости применения разных алгоритмов синтеза РЛИ [290]. Для целостности изложения основные из них и возможные варианты рассмотрены в настоящей главе с учетом их применимости для космических РСА, основные отличия которых от самолетных РСА касаются численных значений параметров сигналов, ограничений, вызванных неоднозначно-

стью сигналов, наличия режима Скансар, различия влияния дестабилизирующих факторов.

### Основные особенности современных РСА

1. В современных РСА используют сложные зондирующие сигналы, преимущественно с ЛЧМ-модуляцией. Как вариант использовались также фазоманипулированные (ФМ) зондирующие сигналы [31], требующие более простого оборудования. Однако появление фазовых искажений в зондирующем импульсе, вызванных доплеровским сдвигом частоты принимаемого сигнала, ограничивает применение ФМ-сигналов в РСА высокого разрешения.

Особым случаем являются сверхширокополосные видеоимпульсные РСА, использующие короткие сигналы типа моноцикла с длительностью в доли наносекунды.

2. В режимах бокового обзора низкого разрешения (обзорном маршрутном или широкозахватном режиме Скансар, когда миграция дальности мала) возможно применение классических алгоритмов согласованной фильтрации двумерных ЛЧМ-процессов: прямой свертки, гармонического анализа, быстрой свертки, а для нефокусированного синтеза РЛИ по азимуту – спектрального анализа с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Такие возможности обусловлены тем, что в современных РСА применяют ориентацию осей космического аппарата в путевой (гринвичской) системе координат (ПСК), при которой линейная миграция дальности практически отсутствует. Суммарное значение линейной и квадратичной миграции не должно превышать 1/4 от разрешения по наклонной дальности.

3. В режимах скошенного кадрового обзора низкого разрешения линейную миграцию дальности можно компенсировать аппаратными средствами или специальной процедурой коррекции входных данных.

4. В режимах высокого разрешения необходимо учитывать не только зависимость временного закона фазы от наклонной дальности  $\Delta\phi(t, R_0)$ , но и миграцию дальности.

При больших размерах синтезированной апертуры, необходимых для реализации высокого разрешения по азимуту, значение миграции дальности на краях апертуры может в десятки и сотни раз превышать размеры элемента разрешения по дальности. Для коррекции миграции дальности используют известные алгоритмы: ЛЧМ-масштабирования (Chirp Scaling Algorithm – CSA), коррекции миграции дальности (Range Migration Algorithm – RMA), преобразования в полярный формат (Polar Formation Algorithm – PFA) и др. [248, 274].

5. В скошенных режимах обзора, а также вблизи границ апертуры синтеза в прожекторном режиме, возможно изменение скорости ЛЧМ по дальности, вызванное доплеровским смещением частоты. Для исключения расфокусировки импульсного отклика по дальности необходима коррекция опорной функции по дальности, компенсирующая фазовые ошибки.

6. Особые сложности в алгоритмах синтеза РЛИ возникают в прожекторном режиме. Они связаны с тем, что диапазон изменения доплеровской частоты в интервале синтеза в космических РСА значительно превышает частоту повторения



зондирующего сигнала, что требует интерполяции сигнала для преобразования к большей базе для исключения неоднозначности сигналов по азимуту.

7. Получение метрового и субметрового разрешения по азимуту требует синтеза апертуры большой протяженности, для которой формирование опорной функции требует знания временного закона изменения фазы с высокой точностью, которую могут не обеспечивать средства измерения текущих координат движения платформы. Дополнительные погрешности фазы могут быть вызваны неоднородностями параметров трассы распространения сигнала – тропосферными (в сантиметровых диапазонах волн) и ионосферными (в дециметровых и метровых диапазонах) флуктуациями.

8. Большое внимание уделяется синтезу РЛИ на борту КА в реальном времени, что позволяет повысить оперативность доставки информации потребителю, уменьшить поток передаваемых по радиолинии данных и упростить наземную аппаратуру. Особо актуальна эта задача для ледовой разведки в полярных районах, а также в системах контроля надводной обстановки. Применение бортовой обработки целесообразно в обзорных режимах работы РСА с получением амплитудных РЛИ среднего или низкого разрешения и применением некогерентного накопления. При использовании алгоритмов сжатия РЛИ (например, формата JPEG), алгоритмов автоматического обнаружения судов и границы вода-суша, сегментации однородных текстур можно значительно сократить поток передаваемых по радиолинии данных. Однако для долговременного архивирования материалов радиолокационной съемки с возможностью получения комплексных РЛИ для последующей обработки, включая интерферометрические методы обнаружения изменений оперативной обстановки, следует предусматривать передачу радиоголограммы.

Надо иметь в виду, что в космических РСА в отличие от самолетных РСА практически отсутствует избыточность радиоголограммы по отношению к составляющим комплексного РЛИ. Применение на борту известных методов сжатия радиоголограммы позволяет снизить разрядность передаваемых данных до двух – четырех разрядов (вместо шести – восьми). Поэтому использование бортовой обработки с синтезом КРЛИ высокого разрешения не даст особых преимуществ в оперативности доставки потребителю конечного информационного продукта по сравнению с передачей радиоголограммы на наземный пункт обработки информации (НКОРЛИ) через спутник-ретранслятор. Наличие на НКОРЛИ высокопроизводительного вычислительного комплекса с применением методов автоматической фрагментации РЛИ может значительно сократить время между моментом съемки и получением требуемой информации по заданным участкам и районам наблюдения.

## **6.2. Параметры, характеризующие миграцию дальности в радиоголограмме**

Исходная операция цифрового синтеза РЛИ – дискретизация, т.е. разделение на временные отсчеты аналогового сигнала с выхода фазового детектора приемника (видеосигнал). Выбор частоты квантования в соответствии с теоремой отчетов В.А. Котельникова – с небольшим запасом от удвоенной максимальной частоты

видеосигнала, в принципе, обеспечивает восстановление аналогового сигнала без искажений. Однако процедуру точного восстановления (свертка сигнала со сглаживающей функцией), требующую дополнительных вычислительных затрат (см., например, [527]), обычно в алгоритмы синтеза РЛИ не включают. При этом оказывается, что передаваемое в ОЗУ процессора мгновенное значение ЛЧМ-видеосигнала от цели, имеющего, например, частоту 100 МГц (период 10 нс) и начальную фазу, определяемую наклонной дальностью цели  $R_0$ , будет зависеть от временной расстановки тактирующих импульсов АЦП, которая при частоте квантования 250 МГц определится периодом, равным 4 нс (при этом дискретность отсчетов фазы ЛЧМ составит  $144^\circ$ ). При движении радиолокатора относительно цели наклонная дальность до цели меняется, что приводит не только к изменению фазы принятого от цели сигнала  $\Delta\phi(t, R_0) = 4\pi(R(t, R_0) - R_0)/\lambda$ , но и к изменению мгновенного значения сигнала в данном канале дальности. В конечном счете, может появиться амплитудная модуляция в радиоголограмме, которая, не будучи учтена надлежащим образом, может вызвать падение уровня выходного сигнала или появление ложных лепестков синтезированной диаграммы на выходном РЛИ. Это явление – миграция дальности – характеризуется двумя составляющими: линейной и, так называемой, «криволинейной» (curvature). Кроме абсолютных значений миграции дальности за время синтеза или существования сигнала в азимутальной ДНА важными являются два параметра — отношение миграции дальности к размеру элемента разрешения  $\Delta_{\rho R} = \Delta R/\rho_R$  и отношение миграции дальности к шагу дискретизации по дальности  $\Delta_{mR} = \Delta R/M_R$ , т.е. к масштабу отсчетов наклонной дальности  $M_R = cT_s/2$ , где  $T_s$  – шаг квантования,  $c$  – скорость света.

Важной характеристикой является также максимальное смещение дальности в соседних за период повторения отсчетах по азимуту на интервале синтеза

$$\delta_R = \max \left\{ \frac{\Delta R(t + T_p, R_0) - \Delta R(t, R_0)}{M_R} \right\}, \quad (6.1)$$

где  $T_p$  – период зондирования.

Как показано в работе [431\*], при смещении по дальности за период повторения, превышающим  $1/4$  от шага дискретизации по дальности, возможно резкое увеличение интегрального уровня импульсного отклика РСА по азимуту.

Отмечено также, что использование ЛЧМ-сигнала (по сравнению с коротким импульсом) уменьшает помехи, вызванные «скачками» импульсов в соседних зондированиях.

Сначала рассмотрим наиболее простой случай строго бокового обзора, когда максимум азимутальной ДНА совпадает с точкой минимальной дальности  $dR/dt = 0$ , в которой доплеровская частота принимаемого сигнала равна нулю. Это обеспечивается на практике в современных РСА, если ориентация КА осуществляется в путевой системе координат, а ошибки ориентации не превышают  $1/4$  от ширины ДНА. Как показано в гл. 5, орбитальное движение можно аппроксимировать

прямолинейным движением с эквивалентной линейной скоростью  $V_{le}$  и представить разложением в степенной ряд относительно  $t=0$  в точке минимальной наклонной дальности  $R_0$ . Тогда временной закон текущей наклонной дальности имеет следующий вид, причем для РСА с низким и средним разрешением можно ограничиться двумя первыми членами ряда

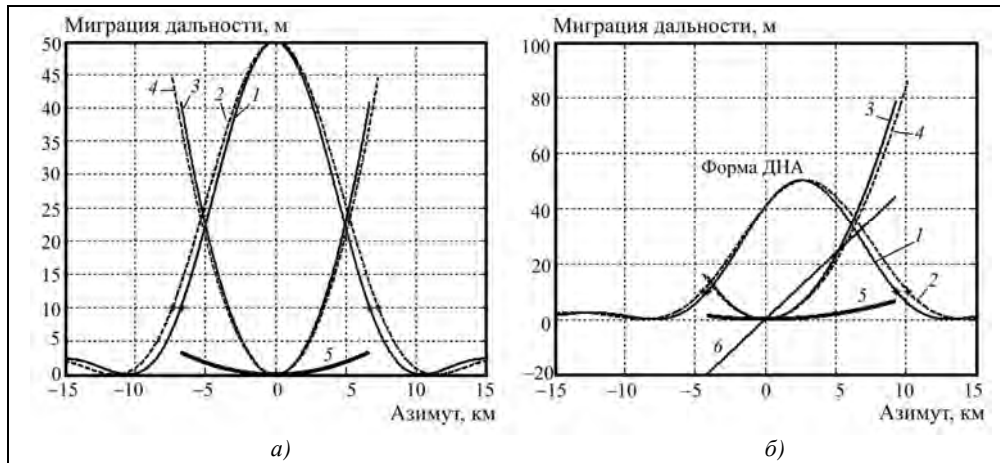
$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + V_{le}^2 t^2} = R_0 + \frac{V_{le}^2}{2R_0} t^2 - \frac{V_{le}^4}{24R_0^3} t^4 + \dots, \quad (6.2)$$

где значения текущего времени  $t$  ограничены допустимым спадом азимутальной ДНА.

Для низкоорбитальных РСА при расчетах параметров миграции можно пренебречь различием значений линейной эквивалентной скорости и путевой скорости.

На рис. 6.1 приведены типичные зависимости миграции дальности для маршрутного режима при строго боковом обзоре (*a*) и при слабо скошенном обзоре (*б*) с углом скоса, равным 1/4 ширины ДНА. Расчетные параметры РСА: длина волны  $\lambda=10$  см, горизонтальный размер антенны  $D_{xant}=5$  м, высота орбиты  $H_0=500$  км, наклонные дальности границ полосы съемки  $R_1 = 520$  км (ближняя) и  $R_2 = 570$  км (дальняя), что обеспечивает полосу съемки по горизонтальной дальности 65 км при углах падения  $50\dots 52^\circ$ .

Как видно из рис. 6.1, *a*, значения миграции дальности в пределах уровня минус 6 дБ составляют 20...25 м с разницей около 2 м для ближней и дальней границ полосы съемки. При наличии ошибок ориентации до 1/4 от ширины ДНА (см. рис. 6.1, *б*) появляется линейная составляющая миграции, а ее суммарная величина достигает 45 м. Заметим, что при увеличении горизонтального размера антенны или уменьшении длины волны РСА значения миграции уменьшаются пропорционально квадрату длины волны и обратно пропорционально размеру антенны.



**Рис. 6.1.** Типичные зависимости миграции дальности от азимутального положения РСА:

*a* – строго боковой обзор; *б* – ошибки ориентации луча на 1/4 ДНА;

1, 2 – формы ДНА по мощности на ближней и дальней границах полосы съемки, точками отмечен уровень 0,5 от максимума принятого сигнала (минус 6 дБ сигнала); 3, 4 – кривые миграции на ближней и дальней границах полосы съемки; 5 – разность приращений дальности на границах полосы съемки относительно точки нуля доплеровской частоты; 6 – линейная составляющая миграция дальности

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Так, для РСА  $S$ -диапазона волн «Меч-КУ» КА «Алмаз-1», где использовалась антенна с горизонтальным размером 15 м, а ошибка ориентации КА составляла около 3 угл. мин., величина миграции дальности не превышала 3 м, что позволяло без ее учета вести синтез РЛИ с разрешением 12...15 м.

На рис. 6.2 приведены графики миграции дальности для прожекторного и скошенного режимов съемки. Поскольку в прожекторном режиме антенна все время направлена на центр кадра, то огибающая сигнала имеет прямоугольную форму и ограничена временем съемки.

Как следует из графиков на рис. 6.2, миграция дальности может составлять сотни и тысячи элементов разрешения, особенно в скошенных режимах обзора, в которых основная – линейная составляющая. Таким образом, за исключением редких случаев, рассмотренных в разделе 6.4, алгоритмы синтеза РЛИ должны включать в себя процедуры устранения миграции дальности, предшествующие сжатию сигналов по азимуту.

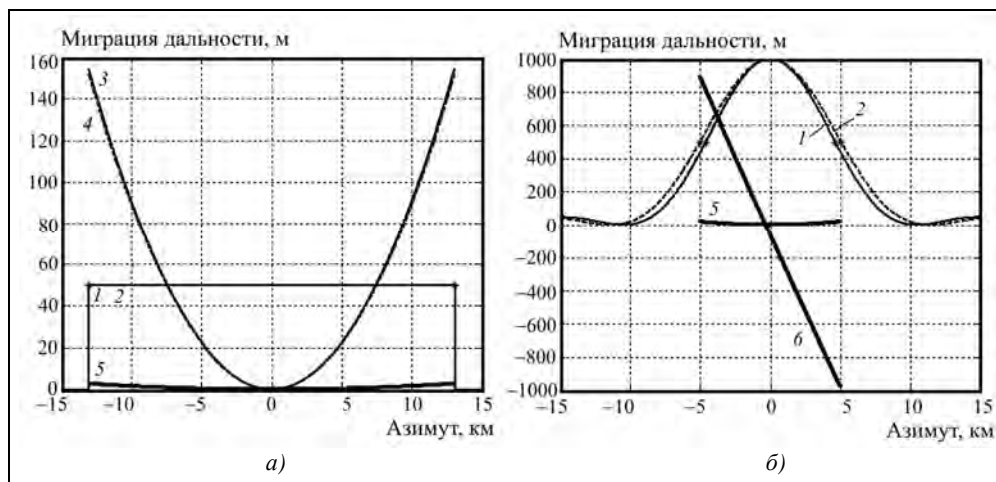


Рис. 6.2. Зависимости миграции дальности от азимутального положения РСА для прожекторного (а) и скошенного (б) режимов:

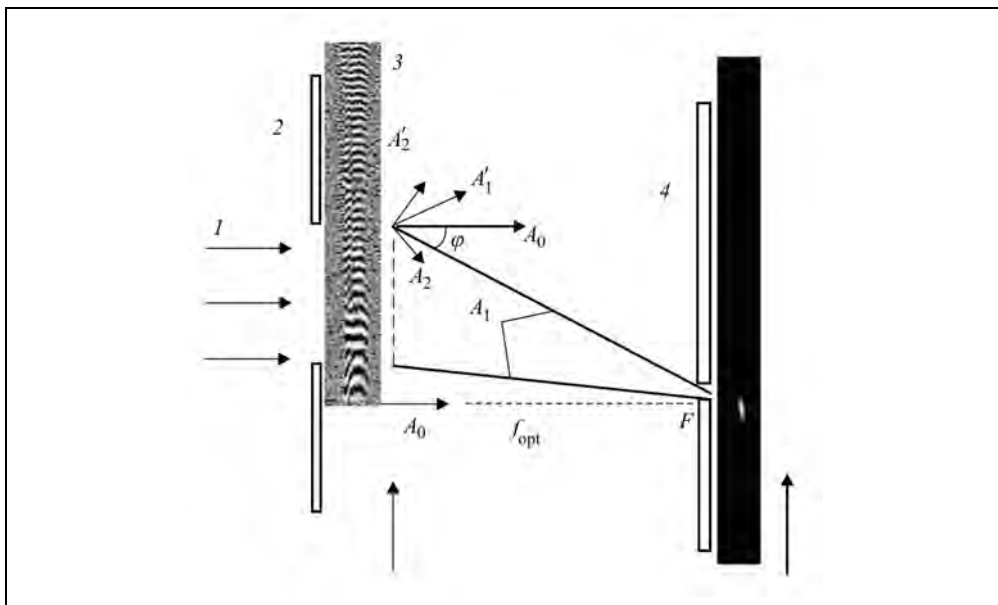
1, 2 – формы ДНА по мощности на ближней и дальней границах полосы съемки, точками отмечен уровень 0,5 от максимума принятого сигнала; 3, 4 – кривые миграции на ближней и дальней границах полосы съемки; 5 – разность приращений дальности на границах полосы съемки относительно точки нуля доплеровской частоты; 6 – линейная составляющая миграция дальности

### 6.3. Оптическая обработка радиоголограммы как модель формирования радиолокационного изображения в РСА

Для получения радиолокационных изображений в первых самолетных и космических РСА (Seasat-A, «Меч-К») использовались оптические устройства синтеза, в которых реализовались основные принципы формирования РЛИ и которые являлись масштабными моделями радиолокационного обзора [194, 195, 213]. При достижимых в те годы параметрах РСА проблем, связанных с миграцией дальности еще не возникало, но вопросы фокусировки изображений и оценки требований к

точности измерения параметров принимаемого сигнала решались вполне успешно. Оптическая обработка сигналов реализует один из подходов к анализу синтеза РЛИ (доплеровский, антенный, согласованной фильтрации) – а именно антенный. Сочетание методов анализа геометрической и волновой оптики позволяет сделать грубую оценку параметров импульсного отклика РСА при синтезе РЛИ, некогерентном накоплении, а также влиянии фазовых ошибок.

Для оптического синтеза РЛИ принятый сигнал с выхода фазового детектора (один канал с выхода приемника, фазовый детектор и АЦП, см. структурную схему, приведенную на рис. 3.5) регистрируют на движущейся первичной фотопленке, в результате чего на ней записывается полупрозрачная радиоголограмма. Далее, фотопленку пропускают через фильмовый канал устройства обработки, принцип действия которого в азимутальном сечении иллюстрирует рис. 6.3.



**Рис. 6.3.** Принцип оптического синтеза РЛИ, сечение по азимуту:

*I* – плоский световой пучок когерентного света (лазера); 2 – фильмовый канал с диафрагмой апертуры синтеза; 3 – первичная фотопленка с записанной радиоголограммой; 4 – вторичная диафрагма; 5 – вторичная фотопленка, регистрирующая РЛИ

Устройство оптической обработки включает в себя: источник монохроматического света (лазер, коллиматор), формирующий плоский световой пучок *I*, фильмовый канал с диафрагмой (первичной щелью) 2 и первичной фотопленкой 3, на которой записана радиоголограмма, оптическую систему с вторичной диафрагмой 4 и вторичную фотопленку 5, регистрирующую РЛИ. Размер диафрагмы 2 определяет длину синтезированной апертуры, а размер вторичной диафрагмы 4 – длину пути некогерентного накопления. Для приведенной схемы без оптики обе фотопленки нужно протягивать с одинаковой скоростью, а в реальных устройствах – с одинаковым отношением скоростей в зависимости от параметров оптической системы.

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Оптический синтез апертуры основан на том, что записанная на фотопленке радиоголограмма представляет собой дифракционную решетку с переменным шагом, обладающую фокусирующим свойством. Это – оптическая модель РСА на несущей частоте  $f_{\text{opt}}$ , соответствующей длине волны источника света  $\lambda_{\text{opt}}$ .

Рассмотрим процесс формирования изображения точечной цели. Образующая радиоголограммой от точечной цели дифракционная решетка имеет период

$$d = \frac{v_1}{F_{\text{Dop}}} = \frac{v_1 R_0 \lambda}{2V_{\text{le}} X} = \frac{v_1 R_0 \lambda}{2V_{\text{le}}^2 t_1}, \quad (6.3)$$

где  $v_1$  – скорость первичной фотопленки при записи радиоголограммы;  $F_{\text{Dop}}$  – доплеровская частота принимаемого сигнала;  $V_{\text{le}}$  – линейный эквивалент скорости радиолокатора;  $X$  – путь, проходимый радиолокатором от направления траверза  $F_{\text{Dop}} = 0$ ;  $t_1$  – время записи сигнала относительно точки траверза  $t_1=0$ , для которой дифракционной решетки не образуется и требуется смещение доплеровской частоты радиоголограммы при записи ее на первичной фотопленке.

Дифракция светового пучка на решетке вызовет появление ряда лучей, отклоненных от оси системы на угол  $\varphi$ , определяемый периодом решетки  $d$  и длиной волны света  $\lambda_{\text{opt}}$ . Угол отклонения определяется соотношением

$$d \sin \varphi_K = K \lambda_{\text{opt}}, \quad (6.4)$$

где  $K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ .

Наиболее интенсивными из этих лучей будут нулевой  $A_0$ , соответствующий прохождению немодулированного света, и лучи первого порядка  $A_1$  и  $A'_1$ , угол отклонения которых определяется условием

$$\sin \varphi = \frac{\lambda_{\text{opt}}}{d} = \frac{2V_{\text{le}}^2 t_1 \lambda_{\text{opt}}}{v_1 R_0 \lambda}. \quad (6.5)$$

Наклонный луч  $A_1$  пересечет ось оптической системы в точке  $F$ , расстояние которой от первичной фотопленки и будет равно фокусному расстоянию записанной на фотопленке радиоголограммы  $f_{\text{opt}}$  (малость  $\lambda_{\text{opt}}$  позволяет сделать замену  $\text{tg} \varphi = \sim \sin \varphi = \sim \varphi$ )

$$f_{\text{opt}} = \frac{x_1}{\text{tg} \varphi} = \frac{v_1^2 R_0 \lambda}{2V_{\text{le}}^2 \lambda_{\text{opt}}}. \quad (6.6)$$

При радиолокационном обзоре луч, соединяющий наблюдаемую цель и радиолокатор, поворачивается по мере его движения на угол, равный  $\alpha_n = \text{arctg} \left( \frac{V_{\text{le}} T_p n}{R_0} \right)$ , где  $n$  – номер зондирования от нуля доплеровской частоты,  $T_p$  – период зондирования.

Если выбрать масштабный коэффициент записи сигналов на первичной фотопленке равным

$$M_{\text{opt}} = \frac{V_{\text{le}}}{v_1} = \frac{\lambda}{2\lambda_{\text{opt}}}, \quad (6.7)$$

то в соответствии с (6.5) луч, формируемый оптической радиоголограммой, будет поворачиваться на тот же угол  $\varphi(T_p n) = \alpha_n$ , обеспечивая масштабное подобие геометрий обзора и обработки. Наклонные лучи  $A_1$ , образованные дифракционной решеткой переменного шага (закон близкий к ЛЧМ) будут пересекать ось в одной точке  $F$  – фокусе радиоголограммы (фокусное расстояние –  $f_{\text{opt}}$ ), где и происходит когерентное суммирование записанных сигналов. Пучок света, образованный лучами  $A'_1$ , отклоненными под зеркальными углами, расходящийся, лучи исходят из мнимого фокуса, расположенного на расстоянии  $f_{\text{opt}}$  перед фотопленкой.

Вторичная фотопленка 5, на которой фиксируется сформированное радиолокационное изображение, помещается в плоскости, проходящей через точку фокусирования  $F$ . Перед ней ставится диафрагма 4, ограничивающая световой поток, экспонирующий вторичную фотопленку, и исключая попадание на нее света от лучей нулевого порядка, расходящегося пучка лучей первого порядка и лучей высших порядков. Заметим, что наличие кроме полезного еще и паразитных лучей требует, чтобы в спектре доплеровских частот не было нулевой составляющей. Запись и обработка сигналов ведется на средней доплеровской частоте, отличной от нуля, примерно равной половине ширины спектра доплеровских частот принимаемого сигнала ( $\Delta F_{\text{Доп}} = \frac{2V_{\text{sg}}}{D_{\text{хant}}}$ ). Для космических РСА обработку ведут на частоте,

равной четверти частоты повторения ( $F_p/4$ ). Чтобы ввести нужное смещение частоты, антенну РСА отворачивают от нормали к вектору путевой скорости или вводят дополнительную модуляцию фазы в излучаемый сигнал. Например, для сдвига частоты на  $F_p/4$  в зондирующем сигнале вводят сдвиг фазы на  $\pi/2$  в каждом периоде зондирования. Показанная на рис. 6.3. ЛЧМ-структура на первичной фотопленке 3 и отметка на вторичной фотопленке 5 являются примерами радиоголограммы и полученного РЛИ при наблюдении компактной цели (корабль на морской поверхности).

### **Некогерентное накопление независимых наблюдений**

Геометрия получения РЛИ при оптическом синтезе, приведенная на рис. 6.3, иллюстрирует случай предельного разрешения по азимуту при одном наблюдении. Реализация некогерентного накопления показана на рис. 6.4.

Первичную диафрагму 2, определяющую апертуру синтеза  $L_a$ , уменьшают, а вторичную  $D_2$  (путь интегрирования) – увеличивают. По мере продвижения фотопленок за первичной щелью оказываются участки решетки, образованные разными доплеровскими частотами и луч поворачивается, экспонируя одну и ту же точку на вторичной фотопленке. Длина накопления определяется длиной радиоголограммы на первичной фотопленке, число независимых отсчетов — отношением длины пути интегрирования  $L_{a \text{ max}}$  к интервалу корреляции сигнала, равному  $L_a/2$  [152\*].

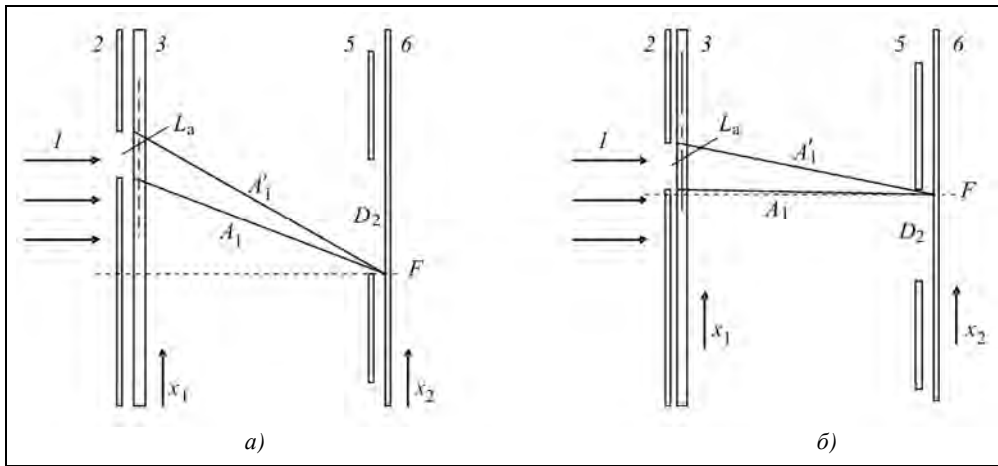


Рис. 6.4. Оптический синтез РЛИ с некогерентным накоплением в высокочастотной (а) и низкочастотной (б) частях спектра доплеровских частот сигнала

### Влияние ошибок фокусирования

Точная фокусировка оптической системы требует выполнения условий (6.7) для заданной наклонной дальности съемки  $R_0$  и значения путевой скорости  $V_{le}$  с учетом выбранных рабочей длины волны РСА и длины волны лазера. На практике это реализуется путем управления скоростью протяжки первичной фотопленки по прогнозным или измеренным баллистическим данным, а при синтезе РЛИ – перемещением положения фильмового канала с вторичной фотопленкой в устройстве обработки. Применяются также оптические системы с переменным фокусным расстоянием, коническими линзами [118, 196, 213], но для нашего рассмотрения эти подробности несущественны. Абстрагируясь от конкретных деталей конструкции устройства оптической обработки, представим геометрию формирования РЛИ в упрощенном виде, как показано на рис. 6.5.

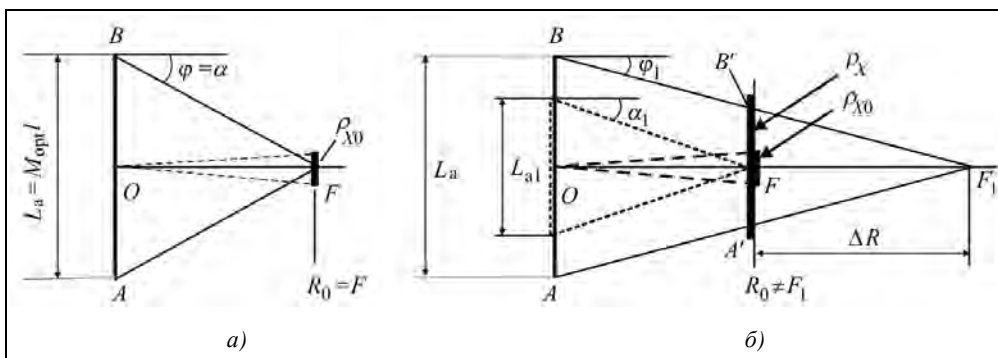


Рис. 6.5. Оптическая модель синтеза фокусированной апертуры: а – точная фокусировка; б – ошибки фокусирования (уменьшение линейной эквивалентной скорости – ЛЭС); буквенные обозначения соответствуют пространству обзора:  $R_0$  – положение плоскости формирования РЛИ (настройка фильтра обработки),  $F$  и  $F_1$  – фокусы радиолограмм при оптическом синтезе



Будем считать, что средняя доплеровская частота в апертуре равна нулю, в отличие от рассмотренного выше физического устройства обработки, в котором геометрия лучей более типична для слабо скошенного обзора.

Сфокусированное в точке  $F$  изображение точечной цели образует пятно, размеры которого определяются дифракцией света на первичной щели. Согласно формулам волновой оптики размер пятна, приведенный к геометрии на местности, будет совпадать с известной формулой разрешения РСА по азимуту

$$\rho_{X0} = \frac{f_{\text{opt}} \lambda_{\text{opt}} M_{\text{opt}}}{l_a} = \frac{R_0 \lambda}{2L_a}, \quad (6.8)$$

где обозначен физический размер оптической апертуры  $l_a = L_a / M_{\text{opt}} = L_a v_1 / V_{le}$ .

Рассмотрим влияние ошибок фокусирования, вызванных погрешностями измерения параметров движения. При изменении значения ЛЭС относительно расчетного (измеренного на момент съемки) значения  $V_{le1} = V_{le0} + \Delta V$  и сохранения значения скорости протяжки  $v_1$  изменится масштаб записи и фокус радиоголограммы согласно (6.6) и (6.7). Так, например, при меньшем значении  $V_{le1}$  ( $\Delta V < 0$ ) реальная апертура в пространстве обзора уменьшится  $L_{a1} = L_a V_{le1} / V_{le0}$ , как и значения доплеровской частоты на ее краях  $F_{\text{Dop max1}} = F_{\text{Dop max}} V_{le1} / V_{le0}$ . Соответственно угол отклонения луча от нормали  $\alpha_1$  будет меньше исходного  $\alpha = \varphi$ . При записи сигналов на прежней скорости  $v_1$  физические размеры оптической апертуры не изменятся (обозначено на рисунке  $L_a = l_a V_{le0} / v_1$ ), периоды дифракционной решетки увеличатся, что приведет к уменьшению угла отклонения  $\varphi_1$  для крайнего луча и к увеличению фокусного расстояния оптической радиоголограммы на величину

$$f_{\text{opt1}} = \frac{v_1^2 R_0 \lambda}{2V_{le1}^2 \lambda_{\text{opt}}} = \frac{V_{le0}^2}{V_{le1}^2} f_{\text{opt}} \approx \left(1 - \frac{2\Delta V}{V_{le1}}\right) f_{\text{opt}} \approx \left(1 - \frac{2\Delta V}{V_{le0}}\right) f_{\text{opt}}. \quad (6.9)$$

Новый фокус  $F_1$  (рис. 6.5, б) удалится на расстояние  $\Delta R$  от фиксированного положения вторичной фотопленки, выбранного по расчетным параметрам (точка  $R_0$ ). Это приведет к увеличению размера пятна в плоскости изображения  $R_0$ , которое можно приближенно оценить по формуле геометрической оптики из подобия треугольников  $ABF_1$  и  $A'B'F_1$

$$\rho_{X\Delta R} = \frac{|\Delta R| L_a}{R_0 + \Delta R} = \left| \frac{L_a (f_{\text{opt1}} - f_{\text{opt}})}{f_{\text{opt1}}} \right| = \left| L_a \left( \frac{V_{le0}^2}{V_{le1}^2} - 1 \right) \right| \approx \frac{2|\Delta V| L_a}{V_{le0}}, \quad (6.10)$$

где  $\Delta R$  и  $\Delta V$  – ошибки измерения дальности и скорости соответственно.

При ошибках по скорости в сторону увеличения ЛЭС фокус оптической радиоголограммы перемещается ближе к фильмовому каналу. При этом количественные соотношения, приведенные в выражении (6.10), сохраняются.

Совместный эффект дифракции и расфокусировки может быть учтен приближенной формулой – сложением в квадратурах размеров пятен, вызванных обоими факторами

$$\rho_X = \sqrt{\rho_{X0}^2 + \rho_{X\Delta R}^2} = \sqrt{\left(\frac{R_0\lambda}{2L_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta RL_a N_e}{R_0}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{R_0\lambda}{2L_a}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta V L_a N_e}{V_{le}}\right)^2}, \quad (6.11)$$

где  $N_e$  – число независимых наблюдений (см. ниже).

Полученное выражение позволяет сделать важный вывод, в том числе и для цифрового синтеза апертуры, о допустимой ошибке фокусирования для реализации требуемого разрешения. В частности, о глубине фокусирования, т.е. возможности сохранить одну и ту же опорную функцию для обработки диапазона дальностей. Преобразуем выражение (6.11) к виду

$$\rho_X = \rho_{X0} \sqrt{1 + (m_{df} / 2)^2}, \quad (6.12)$$

где

$$m_{df} = \frac{\Delta R \lambda N_e}{\rho_{X0}^2} = \frac{2R_0 \lambda N_e}{\rho_{X0}^2} \cdot \frac{\Delta V}{V_{le}} \quad (6.13)$$

– «коэффициент дефокусировки».

При  $m_{df} \leq 1$  ухудшение азимутального разрешения не более 12 %. Глубина фокусирования составляет

$$\Delta R = \frac{\rho_{X0}^2}{\lambda}, \quad (6.14)$$

а допустимая относительная ошибка измерения скорости

$$\frac{\Delta V}{V_{le}} = \frac{\rho_{X0}^2}{2R_0 \lambda}. \quad (6.15)$$

В качестве примера рассмотрим требования для реализации разрешающей способности 1 м в РСА десятисантиметрового диапазона волн при высоте орбиты 500 км, наклонной дальности 700 км и путевой скорости 7500 м/с. Глубина фокусирования составляет  $\Delta R = 10$  м, а допустимая ошибка измерения путевой скорости – относительная  $\Delta V/V_{le} = 7,14 \cdot 10^{-6}$ , абсолютная  $\Delta V = 5,4$  см/с. Эти требования очень жесткие, для их выполнения может потребоваться автофокусировка, рассмотренная в разделе 6.10.

Для случая некогерентного накопления с  $N_e$  числом наблюдений геометрия формирования РЛИ показана на рис. 6.6. При точном фокусировании азимутальное разрешение равно дифракционному  $\rho_{X0}$ , которое определяется длиной парциальной синтезированной апертуры  $L_a$ . При наличии ошибок каждая из парциальных апертур формирует расфокусированное пятно  $A_1A_2, A_2B_1, B_1B_2$  (см рис. 6.6, б) с размером, пропорциональным изменению фокусного расстояния  $\Delta R$ , как и в случае без накопления. Пятна, сформированные боковыми апертурами, смещены относительно центрального, что обусловлено явлением «смаза». Общая ширина искаженной отметки, как видно из рис. 6.6, б, в  $N_e$  раз больше, чем ширина парциального пятна. Таким образом, для случая некогерентного накопления «коэффициент дефокусировки» должен быть увеличен в  $N_e$  раз, что и учтено в формулах (6.11) и (6.13).

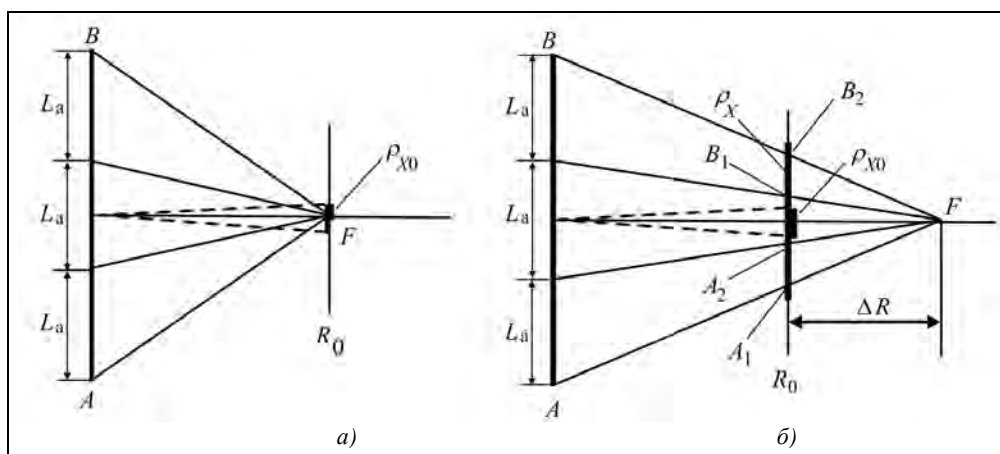


Рис. 6.6. Оптическая модель синтеза фокусированной апертуры с накоплением трех наблюдений ( $N_e = 3$ )

## 6.4. Алгоритмы цифрового синтеза РЛИ без учета миграции дальности

### 6.4.1. Алгоритм прямой свертки

Рассмотрим алгоритмы синтеза РЛИ для бокового обзора в случае, когда миграцией дальности можно пренебречь. Для конкретности дальнейшего рассмотрения определим основные входные параметры, характеризующие сигналы на входе процессора синтеза РЛИ. Их значения являются результатами расчета режимов работы РСА с учетом выбора параметров орбиты, размеров антенны, частоты повторения положения полосы съемки, стробов приема и др.

Входными параметрами являются:

$\lambda$  и  $f_0 = c/\lambda$  – длина волны РСА и несущая частота зондирующего сигнала;

$\tau$  – длительность зондирующего импульса;

$\Delta F$  – полоса спектра зондирующего ЛЧМ-сигнала;

$F_p$  и  $T_p = 1/F_p$  – частота и период повторения импульсов;

$F_s$  и  $T_s = 1/F_s$  – частота и период дискретизации принятых сигналов;

$N_\tau = \tau/T_s$  – число отчетов в длительности импульса;

$N_{r\_max}$  – число отчетов в стробе приема;

$T_{synt}$  – время синтеза;

$N_{synt} = T_{synt}/T_p$  – число синтезируемых импульсов;

$M_R = cT_s/2$  – шаг дискретизации по наклонной дальности (масштаб голограммы и РЛИ);

$R_{min}$  и  $R_{max}$  – наклонные дальности первого ( $m=1$ ) и последнего отчетов сигнала в строке радиолокационных данных. Заметим, что рабочая область дальностей определяется длительностью строба приема минус длительность зондирующего импульса;

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

$Q_A(R, \sigma, G_{\text{ant}}, L_{\text{tr}})$  – коэффициент передачи, определяющий амплитуду сигнала на входе процессора. Он зависит от ЭПР цели, ее удаления от РЛС, а также усиления антенны в направлении на цель по углу места и азимуту. Из этих факторов применительно к синтезу РЛИ имеет значение форма ДНА по азимуту, влияющая на амплитудное взвешивание (аподизацию) сигнала и, соответственно, на разрешение и уровень боковых лепестков импульсного отклика РСА. Влияние остальных факторов относится к оценке чувствительности РСА и вопросам радиометрической калибровки. В данном разделе для простоты влияние этого множителя рассматривать не будем, определяя значение амплитуды сигнала на входе процессора параметром  $U_{\text{max}}$ .

Обычно, излучаемые, а также принимаемые двумерные сигналы рассматривают отдельно в координатах «быстрого времени»  $t_R$  (по наклонной дальности) и «медленного времени» по азимуту  $t_X$ , которое можно выразить через номер зондирующего импульса  $t_X = nT_p$ . Излучаемый сигнал представляет собой последовательность ЛЧМ зондирующих импульсов, каждый из которых характеризуется в «быстром времени» выражением

$$U(t_R, n) = U_{\text{max}} \text{rect}\left(\frac{t_R - \tau/2}{\tau}\right) \exp\left\{j\frac{\pi\Delta F}{\tau}\left(t_R - \frac{\tau}{2}\right)^2 + j2\pi f_0 t_R\right\}, \quad (6.16)$$

где  $\text{rect}(x) = 1$  при  $x \in -0,5 \dots 0,5$  – прямоугольная огибающая, равная единице на интервале  $-0,5 \dots 0,5$  и нулю в остальной области.

Как показано в гл. 5, для орбитального движения, как и для прямолинейного движения, длина синтезированной апертуры  $L_a$  и время синтеза  $T_{\text{synt}}$  определяются заданной разрешающей способностью по азимуту  $\rho_X$

$$L_a = \frac{R_0 \lambda}{2\rho_X}, \quad (6.17)$$

$$T_{\text{synt}} = \frac{R_0 \lambda}{2\rho_X V_{\text{sg}}}, \quad (6.18)$$

где  $V_{\text{sg}}$  – путевая скорость КА, значение которой для низкоорбитальных РСА практически совпадает с эквивалентной линейной скоростью (см. раздел 5.3).

Миграцией дальности пренебрегают, если она на крайних углах ДНА не превышает 1/4 от разрешения по наклонной дальности  $\rho_R$  при максимальной дальности наблюдения  $R_0$

$$\Delta_{\rho R} = R_0 \left(1/\cos(\alpha_{\text{xant}}/2 + \alpha_\psi + \alpha_\theta) - 1\right) \leq \rho_R/4, \quad (6.19)$$

где  $\alpha_{\text{xant}}$  – ширина ДНА;  $\alpha_\psi = \arcsin(\sin \Delta\psi \cdot \sin \gamma_i)$  – составляющая, вызванная ошибками ориентации по курсу  $\Delta\psi$ ;  $\alpha_\theta = -\arcsin(\cos \Delta\psi \cdot \sin \Delta\vartheta \cdot \cos \gamma_i)$  – составляющая, вызванная ошибками ориентации по тангажу  $\Delta\theta$ ;  $\gamma_i$  – угол падения (см. раздел 5.8).

Необходимость учитывать миграцию дальности по всей ширине ДНА, а не только на интервале синтеза объясняется тем, что для получения РЛИ всегда ис-

пользуют полный принимаемый сигнал в зоне облучения ДНА: в маршрутном режиме – для некогерентного накопления, в режиме Скандар – для обеспечения беспропускного обзора.

Принятый от одиночной точечной цели комплексный видеосигнал на выходе фазового детектора приемника в стробе приема для  $n$ -го зондирования будет иметь вид

$$U_r(m, n) = U_{\max} \operatorname{rect}\left(\frac{m - m_T - N_\tau / 2}{N_\tau}\right) \times \exp\left\{j\pi\Delta F \tau \left(\frac{m - m_T - N_\tau / 2}{N_\tau}\right)^2 - j2\pi \frac{2R_T(n)}{\lambda}\right\}, \quad (6.20)$$

где  $m_T = (R_T - R_{\min})/M_R$  – номер отсчета дальности для переднего фронта принятого импульса от цели;  $N_\tau$  – число отсчетов в длительности зондирующего импульса;  $R_{\min}$  – дальность первого ( $m=0$ ) отсчета радиоголограммы в стробе приема. В рассматриваемом случае  $m_T$  не зависит от положения РСА по азимуту (номера строки дальности  $n$ ) вследствие малости миграции дальности;  $R_T(n)$  – текущая наклонная дальность до цели, определяющая фазу и доплеровское смещение принятого сигнала. Считаем, что минимальная наклонная дальность цели на траверзе  $R_{Tnr}$  и ноль доплеровской частоты достигаются при  $n=0$ . При аппроксимации временного закона текущей наклонной квадратичным членом азимутальные отсчеты дальности и фазы определяются формулами

$$R_T(n) = \sqrt{R_{Tnr}^2 + (V_{le} T_p n)^2} \approx R_{Tnr} + \frac{(V_{le} T_p)^2 n^2}{2R_{Tnr}}, \quad (6.21)$$

$$\varphi(n) = 4\pi \frac{R_T(n)}{\lambda} \approx 2\pi \frac{(V_{le} T_p)^2 n^2}{R_{Tnr} \lambda} + \varphi_0, \quad (6.22)$$

где  $\varphi_0$  – постоянная начальная фаза для данной цели.

Известно, что в принципе процедура согласованной обработки может быть реализована в виде согласованного фильтра или корреляционного приёмника. В согласованном фильтре опорная функция свертки  $h(t)$  представляет собой импульсную реакцию фильтра обработки на  $\delta$ -функцию. Ее фазовая характеристика совпадает с комплексно сопряженной временной зависимостью фазы сигнала с обратным законом времени  $\arg[\dot{h}(-k)] = \arg[\dot{U}_r^*(k)]$ , где  $k$  – дискретный аргумент.

Для корреляционного приемника опорная функция  $\dot{h}_{\text{сог}}(-k) = \dot{h}(t)$ . Амплитудная характеристика опорной функции может совпадать с амплитудной характеристикой сигнала от точечной цели, обеспечивая наибольшее отношение сигнал/шум, но с частичной потерей разрешения (по азимуту, если огибающая сигнала на интервале синтеза взвешена формой ДНА). Выбор специальной формы амплитудного взвешивания позволяет повысить разрешение (апертурная коррекция) или снизить уровень боковых лепестков импульсного отклика РСА.

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Согласованная фильтрация по алгоритму прямой свертки реализуется путем свертки комплексного сигнала на видеочастоте с комплексно сопряженной двумерной дискретной опорной функцией, которая является произведением одномерных опорных функций по дальности и азимуту. Будем считать, что огибающая двумерной опорной функции равномерна и равна единице в пределах длительности импульса  $\tau$  и времени синтеза  $T_{\text{synt}}$ . Ее фазовый множитель в разных азимутальных отсчетах зависит от номера канала дальности согласно (6.22)

$$h(m, n) = \text{rect}\left(\frac{m - N_\tau/2}{N_\tau}\right) \exp\left\{-j\pi\Delta F\tau\left(\frac{m - N_\tau/2}{N_\tau}\right)^2\right\} \times \\ \times \text{rect}\left(\frac{n}{N_{\text{synt}}}\right) \exp\left\{j\frac{2\pi(V_{\text{le}}T_{\text{p}})^2 n^2}{(R_{\text{min}} + M_R m)\lambda}\right\}; \quad (6.23)$$

$$m \in 0: N_\tau - 1; \quad n \in -N_{\text{synt}}/2: N_{\text{synt}}/2 - 1.$$

Фаза опорной функции при  $n = 0$  для нулевой доплеровской частоты должна быть равна нулю для всех каналов дальности. Это обеспечит передачу фазы принятых сигналов от цели в выходное комплексное РЛИ и позволит использовать его для интерферометрической обработки снимков.

Операция прямой свертки двумерных дискретных сигналов может быть выполнена двумя одномерными свертками – сначала по дальности, а затем по азимуту. Эта операция выполняется именно в таком порядке потому, что закон изменения второго фазового члена в формуле (6.22) зависит от номера дальностного канала, определяемого минимальной наклонной дальностью цели  $R_0$  в момент ее прохождения через плоскость, нормальную вектору путевой скорости КА.

Свертка сигнала по дальности имеет вид

$$U_X(m - N_\tau, n) = \sum_{k=0}^{N_\tau-1} U_\tau(m - k, n) \times h(k, n) = \\ = \sum_{k=0}^{N_\tau-1} U_{\text{max}} \text{rect}\left(\frac{m - m_T - k - N_\tau/2}{N_\tau}\right) \exp\left\{j\pi\Delta F\tau\left(\frac{m - m_T - k - N_\tau/2}{N_\tau}\right)^2 + j\varphi(n)\right\} \times \\ \times \text{rect}\left(\frac{k - N_\tau/2}{N_\tau}\right) \exp\left\{-j\pi\Delta F\tau\left(\frac{m - m_T - k - N_\tau/2}{N_\tau}\right)^2\right\} = \\ = N_\tau U_{\text{max}} \frac{\sin(\pi\Delta R / \rho_R)}{\pi\Delta R / \rho_R} \exp\{j\varphi(n)\}; \quad (6.24)$$

$$m \in N_\tau/2: N_{\text{strob}} + N_\tau/2 - 1; \quad n \in -N_{\text{synt}}/2: N_{\text{synt}}/2 - 1,$$

где  $\rho_R = c\tau_c/2$  – ширина отклика (по уровню  $2/\pi$ );  $\tau_c = 1/\Delta F$  – ширина сжатого импульса;  $\varphi(n)$  – фаза азимутального отсчета;  $\Delta R = (m - m_T)M_R/2$  – смещение вы-

ходных отсчетов относительно максимума отклика. Число отсчетов по дальности в выходном РЛИ равно числу отсчетов в стробе приема. Однако первые и последние  $N_\tau/2$  выходных отсчетов являются некондиционными, поскольку они содержат боковые лепестки сжатых импульсов с наложенными на них остатками от сжатия по усеченной базе. Поэтому при сшивке нескольких парциальных зон эти участки должны удаляться.

При обработке сигнала корреляционным методом суммирование в формуле (6.24) ведут в прямом порядке (знак плюс у переменной  $k$ ), нумерация выходных и входных отсчетов совпадает.

Максимальное значение модуля выходного сигнала при  $m=m_1$  будет равно  $N_\tau U_{\max}$ . Форма отклика по дальности будет иметь вид  $\sin x/x$  с шириной, равной  $\rho_R=c/2\Delta F$ . Аналогично, свертка  $N_{\text{synt}}$  отсчетов по азимуту даст двумерный отклик от точечной цели

$$\begin{aligned}
 U_{RX}(m, n) &= \sum_{l=-N_{\text{synt}}/2}^{N_{\text{synt}}/2-1} U_{RX}(m, n+l) \times h(m, l) = \frac{\sin(\pi\Delta R / \rho_R)}{\pi\Delta R / \rho_R} \times \\
 &\times \sum_{l=-N_{\text{synt}}/2}^{N_{\text{synt}}/2-1} N_\tau U_{\max}(n+l) \exp\left\{-j \frac{2\pi(V_{\text{le}} T_p)^2 (n+l)^2}{(R_{\min} + M_R m)\lambda}\right\} \text{rect}\left(\frac{l}{N_{\text{synt}}}\right) \times \\
 &\times \exp\left\{j \frac{2\pi(V_{\text{le}} T_p)^2 l^2}{(R_{\min} + M_R m)\lambda}\right\} \approx N_\tau N_{\text{synt}} U_{\max} \frac{\sin(\pi\Delta R / \rho_R)}{\pi\Delta R / \rho_R} \frac{\sin(\pi\Delta X / \rho_X)}{\pi\Delta X / \rho_X}, \quad (6.25)
 \end{aligned}$$

где  $U_{\max}(n+l)$  – распределение амплитуды сигнала по апертуре синтеза, обусловленное формой ДН антенны радиолокатора (форма отклика  $\text{sinc}$  соответствует  $U_{\max}(n+l)=\text{const}$ );  $\rho_X = V_{\text{sg}} \rho_{\text{tx}} \approx R_1 \lambda / 2T_{\text{synt}} V_{\text{le}} = R_1 \lambda / 2L_{\text{synt}}$  – известная формула азимутального разрешения синтезированной апертуры для прямолинейного движения. Приближенное равенство учитывает рассмотренные в гл. 5 особенности орбитального движения, при котором ширина временного отклика  $\rho_{\text{tx}} = R_1 \lambda / 2T_{\text{synt}} V_{\text{le}}$  определяется эквивалентной линейной скоростью и временем синтеза, а разрешение вдоль линии пути зависит от скорости на поверхности Земли.

Для получения одинакового разрешения по азимуту длина синтезированной апертуры должна быть пропорциональна наклонной дальности, что обычно выполняется в маршрутном режиме при полном использовании зоны, облучаемой азимутальной ДНА.

Преимущества алгоритма прямой свертки заключается в возможности непрерывной обработки всего маршрута (режим маршрутной съемки) с реализацией предельного разрешения, равного половине горизонтального размера антенны. Выходное РЛИ в координатах наклонная дальность-азимут получается с равномерным шагом по азимуту без масштабных искажений. Общим недостатком алгоритма прямой свертки является большое число комплексных операций умножения

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

сигнала на опору и сложений. Для обработки  $N_{\text{synt}}$  строк дальности суммарное число операций составляет

$$N_{\text{op}} \approx N_{\tau} (N_r - N_{\tau} + 1) \cdot N_{\text{synt}}^2, \quad (6.26)$$

где  $N_{\tau}$  – число отчетов в длительности импульса;  $N_r$  – число отчетов в строке дальности.

Приведенная оценка является приближенной, так как она не учитывает различия между комплексным сложением (две операции с действительными числами) и комплексным умножением (четыре операции с действительными числами) и зависит от архитектуры процессора.

Следует отметить, что применительно к обработке ЛЧМ-сигналов алгоритм прямой свертки имеет резервы для снижения требований к производительности вычислительных средств. Так, при синтезе РЛИ в РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1» использовался алгоритм субапертурной обработки, в котором применена линейно-ломаная аппроксимация закона изменения фазы [90\*, 157\*, 158\*]. Это позволило часть операций умножения заменить сложениями и уменьшить требования к памяти вычислительного комплекса ПС-2000. Определенные перспективы имеет применение алгоритма прямой свертки в процессорах бортового и наземного синтеза РЛИ с использованием специализированных интегральных микросхем.

### 6.4.2. Алгоритм быстрой свертки

Один из самых производительных и наиболее распространенных алгоритмов – это алгоритм быстрой свертки, который реализует фильтрацию сигнала в частотной области. Он использует известное свойство преобразования Фурье, что свертке сигналов во временной области соответствует произведение спектров в частотной области. Или иначе, спектр свертки сигналов равен произведению спектров каждого из сигналов. Свертка сигнала с опорной функцией ( $\otimes$  – знак свертки) имеет вид

$$\dot{U}_{\text{out}}(t) = \dot{U}(t) \otimes \dot{h}(t). \quad (6.27)$$

Спектр выходного сигнала

$$\dot{S}_{\text{out}}(f) = \dot{S}_U(f) \times \dot{S}_h(f), \quad (6.28)$$

где  $\dot{S}_h(f)$  – спектр опорной функции (частотная характеристика фильтра обработки).

Выходной сигнал после быстрой свертки формируется в виде последовательности процедур

$$\dot{U}_{\text{out}}(t) = \text{FFT}^{-1}[\dot{S}_{\text{out}}(f)] = \text{F}^{-1}[\dot{S}_U(f)\dot{S}_h(f)], \quad (6.29)$$

где  $\text{FFT}^{-1}$  – обратное преобразование Фурье.

Преимущества быстрой свертки реализуются при использовании для дискретного преобразования Фурье алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Структурная схема алгоритма быстрой свертки представлена на рис. 6.7. Он реализуется двумя одномерными процедурами – сжатием дальности и по азимуту. Базу БПФ по дальности  $M_{\text{FFT}}$ , как правило, выбирают равной ближайшему числу, кратному степени 2, превышающему число отсчетов по дальности в строке приема



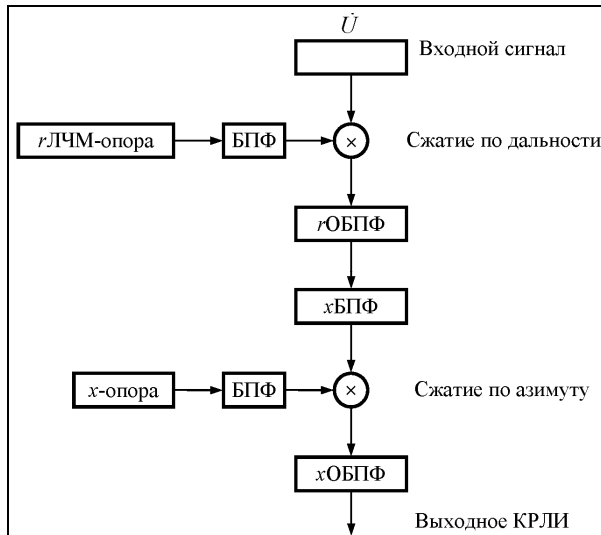


Рис. 6.7. Алгоритм быстрой свертки при отсутствии миграции дальности

(полоса съемки плюс длительность зондирующего импульса). Алгоритм синтеза включает в себя получение спектра сигнала методом БПФ, умножение на спектр опорной функции и обратное преобразование Фурье. При сжатии по азимуту базу БПФ  $M_{x\text{FFT}}$  выбирают примерно равной удвоенной длине синтезированной апертуры, затем производятся умножение спектра сигналов на частотную характеристику фильтра и обратное преобразование Фурье. Фильтр обычно задают фазовой характеристикой, сопряженной с сигналом, при этом огибающую выбирают из условия ма-

лости боковых лепестков в выходном сигнале (амплитудное взвешивание – аподизация). Частотную характеристику фильтра (спектр опорной функции) для случаев низкого разрешения можно рассчитать аналитически либо получить путем преобразования Фурье опорной функции, вычисляемой по баллистическим данным – текущим координатам КА. Непрерывное РЛИ из кадровых получают путем «сшивки» зон перекрытия соседних кадров.

Преимуществами алгоритма быстрой свертки являются его высокая производительность, простота перестройки, получение выходного РЛИ без масштабных искажений при изменении наклонной дальности. Число требуемых операций комплексного умножения-сложения составляет примерно

$$N_{\text{оп}} \approx 2M_{r\text{FFT}} \log_2(M_{r\text{FFT}}) \times 2M_{x\text{FFT}} \log_2(M_{x\text{FFT}}), \quad (6.30)$$

что в сравнении с формулой (6.26) меньше, чем требуемое для прямой свертки.

Таким образом, алгоритм цифрового синтеза методом быстрой свертки представляется набором процедур:

1) сжатие по дальности (спектр опоры  $\dot{F}_{HR}(m)$ )

$$\begin{aligned} \dot{U}_R(m, n) &= \text{FFT}^{-1} \left\{ \text{FFT} [\dot{U}(m, n)] \dot{F}_{HR}(m) \right\}; \\ m \in 0: M_{r\text{FFT}} - 1; \quad n &= 0: M_{x\text{FFT}} - 1, \end{aligned} \quad (6.31)$$

где  $M_{r\text{FFT}}$ ,  $M_{x\text{FFT}}$  – размеры баз БПФ (кадра) по дальности и азимуту;  $\dot{U}(m, n)$  – входная радиоголограмма с числом отсчетов  $M_{r\text{FFT}} \times M_{x\text{FFT}}$ , причем отсчеты по наклонной дальности за пределами строга приема обнулены;

2) сжатие по азимуту (синтез РЛИ):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{RX}(m, n) &= \text{FFT}^{-1} \left\{ \text{FFT} \left[ \dot{U}_R(m, n) \right] \dot{F}_{HX}(m, n) \right\}; \\ m \in 0 : M_r - 1; \quad n \in 0 : M_x - 1, \end{aligned} \quad (6.32)$$

где  $M_r$  – число отсчетов по дальности в выходном РЛИ, равное числу отсчетов сигнала в строке приема;  $\dot{F}_{HX}(m, n)$  – спектр опорной функции сжатия сигнала по азимуту, закон частотной модуляции которого зависит от номера отсчета по дальности.

Число отсчетов выходного РЛИ составляет  $M_r \times M_x$ , где  $M_x$  – число отсчетов в кадре выходного РЛИ по азимуту, обычно равное половине базы БПФ по азимуту. Масштабы изображения определяются по формулам, приведенным в подразделе 5.6.7.

### **6.4.3. Алгоритм гармонического (спектрального) анализа**

В ряде ситуаций, например, в режиме Скансар, в том числе и при нефокусированном синтезе, требуемая длина синтезированной апертуры оказывается много меньше области облучения ДНА, а разрешение по азимуту в несколько раз превышает шаг азимутальных отсчетов. Применение для сжатия по азимуту алгоритма быстрой свертки оказывается неэффективным, так как число требуемых операций не уменьшается, а после синтеза РЛИ понадобится прореживание выходных отсчетов (децимация) для устранения избыточности. Простая свертка позволяет уменьшить число операций в число раз, равное шагу прореживания, однако оно все равно остается большим.

Применение процедуры БПФ для синтеза апертуры позволяет существенно облегчить требования к процессору. Простейшим случаем является нефокусированный синтез апертуры путем спектрального анализа, выполняемого с помощью БПФ. Особенности такого режима состоят в том, что он кадровый, с длиной кадра  $L_a \leq \sqrt{R\lambda}$  и соответственно с разрешающей способностью не лучше, чем  $\rho_x \geq 0,7\sqrt{R\lambda}$ .

Для фокусированного синтеза апертуры сигнал предварительно гетеродинируют путем его умножения на ЛЧМ-опору, сопряженную с ЛЧМ-сигналом. В результате от каждой цели, смещенной по доплеровской частоте, получают немодулированный (deramped) комплексный сигнал с постоянной амплитудой, пропорциональной амплитуде цели с учетом формы ДНА по азимуту (а также – по углу места). Такой алгоритм называют *гармоническим анализом* (в зарубежных источниках используют один термин SPECAN – Spectrum Analysis для обоих вариантов алгоритмов нефокусированного и фокусированного синтезов РЛИ). В обоих алгоритмах шаг формируемых отсчетов по азимуту пропорционален изменению доплеровской частоты, поэтому масштабы по азимуту имеют разное значение для каналов дальностей в каждой из зон. Для получения равномасштабного РЛИ применяют интерполяцию отсчетов, что требует дополнительных вычислительных ресурсов. В связи с этим требуемое число операций оказывается большим, чем  $N_{op}/2$ , вычисленное по формуле (6.30). В ряде случаев, например, в РСА, предназначенных для контроля надводной обстановки с бортовым синтезом РЛИ и автоматическим обнаружением целей, эта особенность может быть несущественной. В таких

РСА азимутальную координату обнаруженных объектов рассчитывают по номеру частотного канала на выходе БПФ.

Метод гармонического анализа эффективно используют для синтеза РЛИ в режимах Скансар и прожекторном при наличии миграции дальности. Поскольку радиоголограмма и ее спектр по азимуту являются ЛЧМ-процессами, для интерполяции применяют алгоритмы ЛЧМ-масштабирования по азимуту (FSA), аналогичные масштабированию по дальности (CSA, ECS), которые используются для коррекции миграции дальности [141\*, 419].

Последовательность операций синтеза РЛИ в режиме Скансар включает сжатие по дальности (6.31) и сжатие по азимуту методом гармонического анализа (умножение на ЛЧМ-опору и хБПФ)

$$\dot{U}_{RX}(m, n) = \text{FFT} \{ \dot{U}_R(m, n) \dot{H}_X(m, n) \}; \quad m \in 0: M_r - 1; \quad n \in 0: M_x - 1, \quad (6.33)$$

где  $\dot{H}_X(m, n)$  – опорная функция по азимуту с законом частотной модуляции, зависящим от наклонной дальности. Эта зависимость не такая резкая, как в маршрутном или прожекторном режимах с более высоким разрешением по азимуту. Поэтому возможно ее ступенчатое изменение по группе отсчетов. Число отсчетов опорной функции  $M_x$  соответствует длине синтезированной апертуры в режиме Скансар, а база хБПФ – ближайшему большему числу  $2^N$ .

Как было отмечено выше, получение равномасштабного РЛИ требует интерполяции первичного РЛИ. Для этого применяют процедуры интерполяции, в том числе включенные в состав алгоритмов синтеза РЛИ с учетом миграции дальности, которые рассмотрены в следующих разделах.

## **6.5. Процедуры масштабирования и интерполяции комплексных сигналов**

### **6.5.1. Масштабирование путем свертки с ЛЧМ-опорой**

Потребность в операциях масштабирования и интерполяции временных и частотных процессов возникает при синтезе РЛИ, преобразовании РЛИ в картографические проекции, интерферометрической обработке материалов радиолокационной съемки, а также при оценке характеристик выходных информационных продуктов. Широкое применение для синтеза РЛИ с компенсацией миграции дальности нашли упомянутые выше алгоритмы ЛЧМ-масштабирования CSA и их расширенные варианты ESC (Extended Chirp Scaling) и FSA (Frequency Scaling Algorithm). Учитывая важность этих операций, рассмотрим их формульное обоснование. Следует отметить, что эти алгоритмы носят приближенный характер, требуют оценки их точности и обобщения на комплексные сигналы произвольной структуры. Применяемый для масштабирования универсальный алгоритм Sampling Rate Conversion (SRC) [274], который, фактически, является приближенной интерполяцией по условию Котельникова методом прямой свертки с шаблоном двумерной функции sinc(.) «с усеченными хвостами», является компромиссным между точностью и производительностью.

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Сначала рассмотрим процедуру, которая является основой (и обобщением) алгоритма CSA. Адаптация алгоритма CSA к случаю сигналов общего вида включает в себя следующие этапы [139\*, 141\*, 433\*]:

1) искусственное введение в сигнал изначально отсутствующей ЛЧМ-структуры путем свертки данного сигнала с определенным ЛЧМ-сигналом, имеющим крутизну ЛЧМ, определяемую заданным коэффициентом масштабирования  $a$ ;

2) компенсация ЛЧМ-составляющей в результирующем сигнале, принимающем вид линейной комбинации гармоник, частоты которых соответствуют величинам сдвигов отсчетов исходного сигнала, помноженным на масштабирующий коэффициент, т.е. фактически получаем *Фурье-образ желаемого сигнала* – сигнала с надлежащим образом измененным масштабом;

3) обратное преобразование Фурье.

Первый этап является искусственным созданием ситуации, используемой в алгоритме CSA, второй и третий этапы являются аналогом процедур гармонического анализа.

Полную операцию свертки сигнала  $x(i) = \delta_N(i-n)$  с ЛЧМ-сигналом  $H_a(i) = \exp\left\{j\frac{\pi}{N}ai^2\right\}$  можно представить в виде

$$y(i) = x(i) \otimes H_a(i) = \exp\left\{j\frac{\pi a}{N}(i-n)^2\right\} = \exp\left\{j\frac{\pi}{N}an^2\right\} \exp\left\{j\frac{\pi}{N}ai^2\right\} \exp\left\{-j\frac{2\pi}{N}ani\right\}, \quad (6.34)$$

где  $a$  – параметр крутизны ЛЧМ;  $i$  – независимая переменная (счетчик в массиве);  $\otimes$  – значок свертки.

Предполагаем, что ЛЧМ-опора  $H_a(i)$  определена на *бесконечной дискретной оси* (хотя сам сигнал определен на интервале  $-N/2 \dots N/2-1$ ) и свертывание также производится по бесконечной оси.

Первый множитель в формуле (6.34) – константа, второй – центрированная ЛЧМ-составляющая, зависящая только от параметра крутизны  $a$ , третий – линейный набег фазы от смещения  $n$ . После компенсации ЛЧМ-составляющей получаем, включая фазовый множитель-константу  $C(n)$

$$y_1(i) = C(n) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{N}ani\right\}. \quad (6.35)$$

Применяя к сигналу формулы (6.35) обратное преобразование Фурье, получаем *ядро Дирихле* с периодом  $N$  и базой  $N$  – функцию  $\delta_N(\cdot)$ , являющуюся точным конечно-дискретным аналогом изображенной на рис. 6.8  $\delta$ -функции для частного случая *целого сдвига*

$$\begin{aligned} z(i) &= C(n) \exp\left\{-j\frac{2\pi}{N}ani\right\} \sum_{-N/2+1}^{N/2} \exp\left\{-j\frac{2\pi}{N}(n-k)i\right\} = \\ &= \exp\left\{j\frac{\pi an^2}{N}\right\} \delta_N(i-an). \end{aligned} \quad (6.36)$$

Для масштабируемого сигнала произвольного вида, являющегося линейной суммой таких  $\delta$ -функций, наличие  $C(n)$  фактически будет означать появление на выходе паразитной ЛЧМ вида  $\exp\left\{j\frac{\pi}{Na}i^2\right\}$ , так что для полного масштабирования (не только огибающей, но и фазы сигнала) надо еще скомпенсировать эту ЛЧМ.

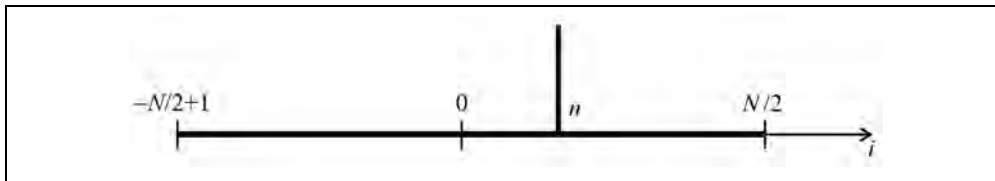


Рис. 6.8. Дискретный аналог дельта-функции  $\delta_N(i-n)$  в массиве размером  $N$  имеет значение 1 в отсчете номер  $n$  (относительно середины массива) и значение 0 – в остальных

Таким образом, параметр крутизны  $a$ , на который умножилась величина сдвига произвольно взятой  $\delta_N$ -функции от центра массива, является масштабирующим множителем сигнала общего вида, как линейной суперпозиции смещенных по  $n$   $\delta$ -функций. Структурная схема реализации этого алгоритма приведена на рис. 6.9.

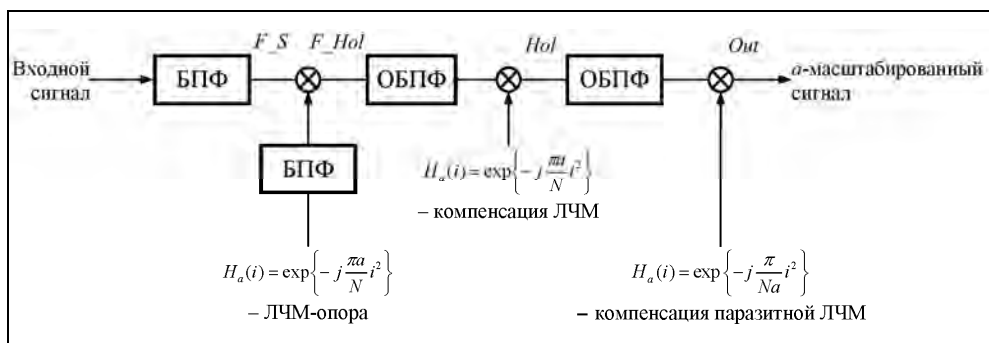
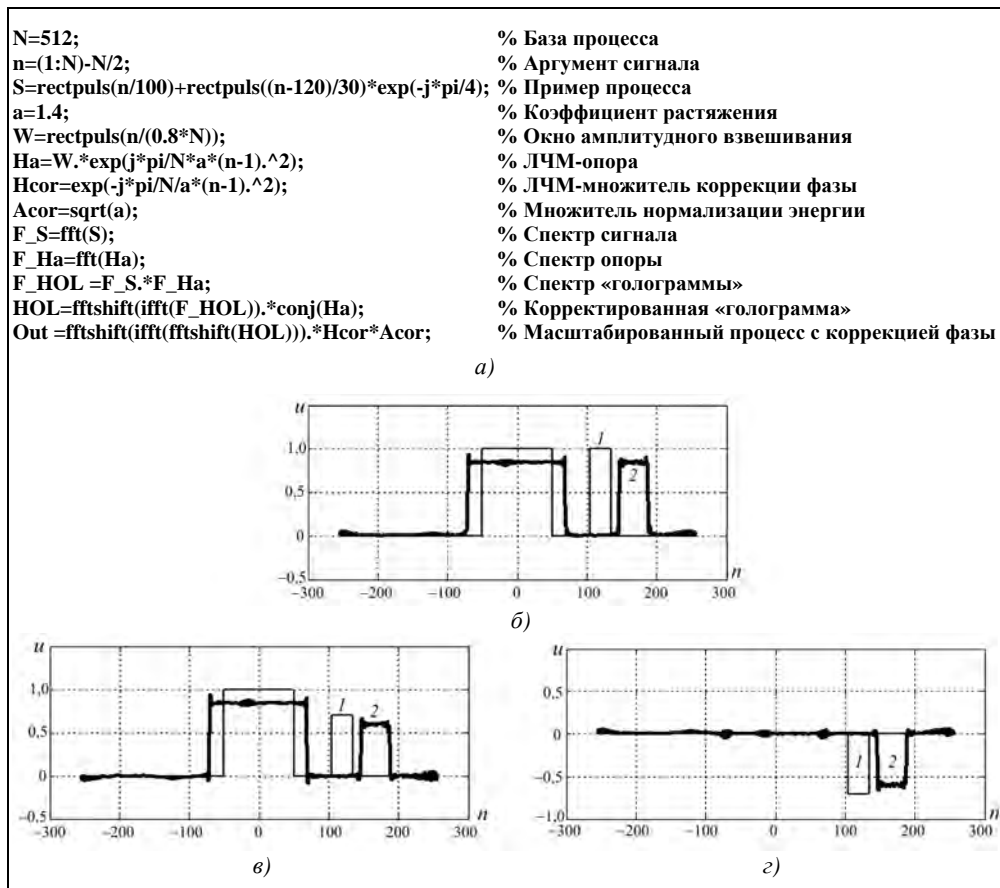


Рис. 6.9. Структурная схема алгоритма ЛЧМ-масштабирования методом быстрой свертки с компенсацией паразитной ЛЧМ

На рис. 6.10 дан пример масштабирования комплексного сигнала в среде МАТЛАБ [433\*]. Входной сигнал представляет собой два импульса с единичной амплитудой: длинный – действительный (фаза равна нулю) и короткий – с фазой, равной минус  $45^\circ$ . База моделирования  $N=512$ , коэффициент растяжения  $a=1,4$ . Для устранения паразитных эффектов, связанных с дискретизацией сигнала, введена прямоугольная весовая функция  $W(n) = \text{rectpuls}(n/0.8N)$ , ограничивающая краевые эффекты. Приведенная процедура, является, по существу, моделью преобразований сигналов в РСА – формирования радиоголограммы и синтеза комплексного РЛИ. Чтобы подчеркнуть эту близость, продукт первой свертки обозначен как «Hol». Для сохранения фазы выходного масштабированного процесса его умно-

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

жают на корректирующую функцию Hcor. Сохранение амплитуды выходного процесса достигается умножением его на корректирующий множитель, равный  $a$ , нормализация по энергии (показано на рисунке) – на множитель, равный  $\sqrt{a}$ .



**Рис. 6.10.** Пример масштабирования комплексного сигнала с использованием ЛЧМ-преобразований: *a* – текст МАТЛАБ-программы; *б* – амплитуды входного (1) и выходного (2) сигналов; *в* – действительные составляющие входного (1) и выходного (2) сигналов; *г* – мнимые составляющие входного (1) и выходного (2) сигналов

Рассмотренный пример относится к случаю, когда частота дискретизации сигнала выбрана с большим запасом к неоднозначности по частоте. В реальной ситуации приходится иметь дело с массивом из конечного числа  $N$  элементов и, таким образом, с ЛЧМ-опорой, определенной на интервале длины  $N$  (с распространением на всю ось по периодичности).

На стадии компенсации ЛЧМ на первом этапе происходит *вычитание* из частоты сигнала частоты опоры, как показано на рис. 6.11,а. На рис. 6.11,а цифрой 1 обозначен график изменения частоты ЛЧМ-опоры, цифрой 2 – график изменения частоты свертки ЛЧМ-опоры со «сдвинутой дельта-функцией»  $\delta_N(i-n)$ . График 2

имеет разрыв в точке  $-N/2+n$ . График 1 имеет зависимость  $f_1(i) = nai$ , график 2 – зависимость  $f_2(i) = na(i - n)$  (с «зацикливанием» вдоль оси  $i$  по периодичности).

На рис. 6.11,б изображен график разности этих частот. На интервале после ЛЧМ-компенсации  $[-N/2, -N/2+n]$  получаем гармонику частоты  $\Delta f_1 = (n+N)a$ , а на интервале  $[-N/2+n, N/2]$  — гармонику частоты  $\Delta f_2 = na$ . Налицо разрыв частоты в точке  $-N/2+n$  величиной  $Na$ . В этом причина возникновения «паразитной неоднозначности» при попытке применить «в лоб» классический метод к задаче масштабирования в конечно-дискретной ситуации. В рассмотренном на рис. 6.10 примере длительность сигнала значительно меньше, чем размерность базы моделирования, и указанная неоднозначность не появляется. Следует также отметить, что при масштабированном коэффициенте  $a = 1$  величина разрыва частоты равна  $N$ , а в силу дискретности сигнала и связанного с ней зацикливания частоты с периодичностью  $N$ , можно считать, что разрыв частоты равен 0, и паразитная неоднозначность отсутствует.

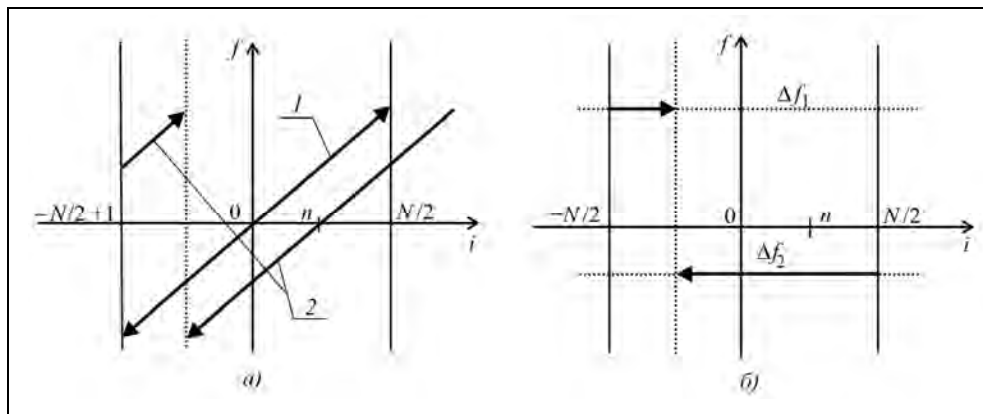


Рис. 6.11. Графики зависимости и разности частот:

а – зависимость частоты ЛЧМ-опоры (1) и «свернутого» с ней сигнала (2) от номера частотного канала  $i$ ;  
б – разность частот на двух участках

### 6.5.2. Расширение массива данных заполнением нулями

Во избежание появления описанной паразитной неоднозначности можно применить процедуру расширения («раздвижки») массива данных с заполнением нулями дополнительных отсчетов (zero padding). Фактически, сигнал записывается на **расширенной базе**, размер которой выбирается из следующих соображений:

- база должна быть целой степенью двух ( $2^m$ ) для возможности применения алгоритма БПФ (ОБПФ);
- положение разрыва частоты, возникающего в процессе масштабирования, должно быть за пределами информационной части массива (попадать на дополнительные отсчеты).

Пример применения этого метода приведен на рис. 6.12, где рассматривается масштабирование широкополосного комплексного сигнала, состоящего из трех коротких импульсов в начале, в середине и в конце массива входных данных. Дли-

тельность импульсов равна двум отсчетам (для выполнения условия Котельникова), фаза импульсов произвольная ( $-110, 0, 155^\circ$ ).

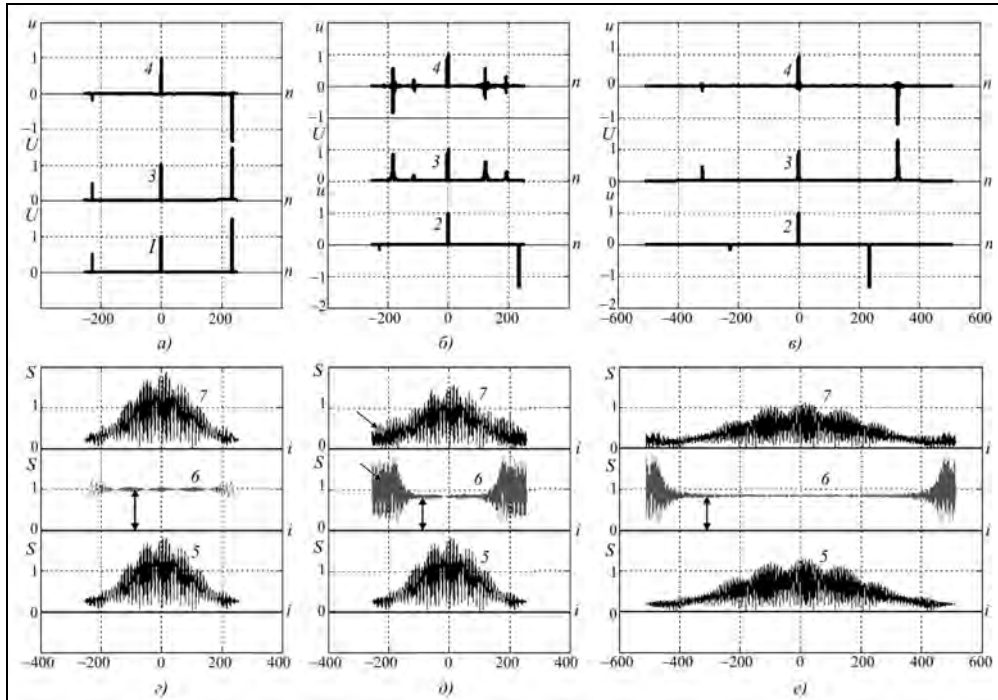


Рис. 6.12. Примеры расширения массива данных методом «раздвижки» с заполнением нулями для исключения неоднозначности сигнала:

$a$ – $в$  – амплитуды (1 и 3) и действительные составляющие (2 и 4) входного сигнала (1 и 2) и масштабированного сигнала (3 и 4);  $г$ – $е$  – спектры сигналов — входного (5), выходного сигнала (7) и прямоугольной опорной функции с единичной амплитудой (6);  $a, г$  – коэффициент расширения  $a=1$ ;  $б, в, д, е$  – коэффициент расширения  $a=1,4$ ;  $a, б, г, д$  – размер массива входных данных  $N=512$ ;  $д, е$  – преобразованный размер массива входных данных  $N=1024$

Для случая, когда масштабирование отсутствует (при  $a=1$ ), выходной сигнал повторяет входной сигнал как по амплитудам (1 и 3 на рис. 6.12,а), так и по комплексным составляющим (показаны только действительные составляющие — 2 на рис. 6.12,б и 4 на рис. 6.12,а). Амплитудные спектры входного и выходного сигналов (5 и 7 на рис. 6.12,г) также одинаковы (сумма откликов  $\sin x/x$ ). Колебания амплитудного спектра определяются расстановкой импульсов в сигнале. Спектр опорной функции – френелевский (6 на рис. 6.12,г), практически равномерный с небольшими колебаниями на границах.

При коэффициенте растяжения  $a=1,4$  (рис. 6.12,б и д) форма выходного сигнала искажается. У границ спектров опорной функции и выходного сигнала появляются биения со «свернутыми» компонентами (отмечены стрелками). Полезная (неискаженная) область равномерного спектра опорной функции сокращается до 70 % от первоначальной.



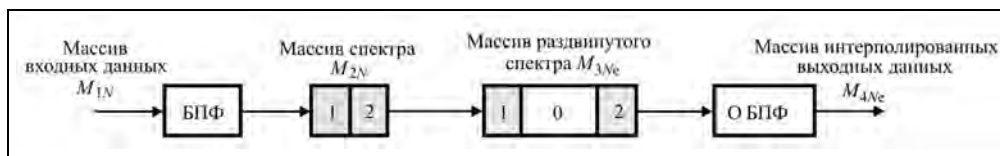
Эффекты неоднозначности исчезают при увеличении размера массива данных в два раза  $N = 1024$  при сохранении формы входного сигнала (рис. 6.12, *в* и *д*). Для масштабирования сигнала применяют опорную функцию с крутизной ЛЧМ, обратно пропорциональной расширению массива данных. При выполнении процедур масштабирования равномерная область спектра опорной функции расширяется, влияние на нее и на спектр выходного сигнала компонент из «свернутой» области резко уменьшается и процесс масштабирования сигнала оказывается корректным.

Следует отметить ряд моментов. Если входным сигналом является временной процесс, дискретизированный тактовой частотой АЦП, то при расширении массива данных с заполнением нулями ширина частотного спектра не изменяется – просто он отображается с более мелким шагом по частоте. Если исходный сигнал уже имеет ЛЧМ-модуляцию (например, сигнал, отраженный от точечной цели при ЛЧМ зондирующем сигнале или фрагмент азимутальной радиоголограммы), то возможно масштабирование результатов сжатия таких сигналов (по дальности или азимуту) путем гетеродинирования данного процесса с ЛЧМ опорной функцией с соответствующей крутизной ЛЧМ. В этом и состоит принцип алгоритмов CSA и FSA, используемых при синтезе РЛИ.

Применение масштабирования по азимуту для выравнивания шага выходных отсчетов по азимуту при изменении наклонной дальности цели устраняет основной дефект высокопроизводительного алгоритма гармонического анализа, делая его предпочтительным для синтеза РЛИ в режиме Скансар и прожекторном режиме. Операции расширения массива входных данных позволяют, в частности, устранить проблемы азимутальной неоднозначности в прожекторном режиме, в котором диапазон изменений доплеровской частоты значительно превышает частоту повторения зондирующих сигналов.

### 6.5.3. Интерполяция комплексных процессов методом «раздвижки спектра»

В ряде ситуаций возникает необходимость интерполяции сигналов с имеющейся частотой дискретизации на более высокую частоту, например, при измерении ЭПР точечных объектов, анализе формы импульсного отклика РСА по РЛИ, полученного с дискретностью, достаточной для передачи информации, но требующей преобразования для приближения к гладким непрерывным функциям. Эти задачи легко решаются методом «раздвижки спектра», схема которого приведена на рис. 6.13. По массиву  $M_{1N}$  размерностью  $N$  с входными данными формируется с помощью операции БПФ спектр  $M_{2N}$  также с размерностью  $N$ . Далее создают расширенный массив  $M_{3N_e}$  размерностью  $N_e = 2^k N$ , заполненный нулями. В него переносят начальный и конечный фрагменты спектра  $M_{2N}$  и далее выполняют операцию ОБПФ на базе  $N_e = 2^k N$ .



**Рис. 6.13.** Структурная схема алгоритма интерполяции данных методом «раздвижки спектра»

Корректное выполнение операций БПФ и ОБПФ с сохранением равенства суммарных энергий сигнала во временной и спектральной областях согласно равенству Парсеваля требует, чтобы при выполнении БПФ значения спектра были разделены на нормирующий множитель  $\sqrt{N}$ , а при ОБПФ – умножены на  $\sqrt{N}$  (или  $\sqrt{N_e}$  для расширенной базы). В стандартных программных пакетах (например, МАТЛАБ) нормирующий множитель может отсутствовать для ускорения работы процедур `fft` и `ifft`, хотя совместная работа процедур сохраняет суммарную энергию сигнала.

В [141\*] изложен корректный алгоритм прецизионного линейного масштабирования, основанный на сочетании операций раздвижки массивов данных во временной и спектральной областях. Использованный подход является адаптацией к случаю конечно-дискретного сигнала известного в математике факта (извлечение из так называемого «исчисления Вейля» [230]), согласно которому оператор изменения масштаба прямой ( $S: f(x) \rightarrow f(ax)$ ) может быть представлен в виде композиции операторов, применяемой к обобщенным функциям  $f(x)$  на прямой и включающих БПФ, ОБПФ, умножение на ЛЧМ-функции.

В практических задачах синтеза РЛИ для космических РСА требуемые значения параметра масштабирования сигналов отличаются от единицы на сотые доли, что облегчает проблему устранения неоднозначности и позволяет получить высокую производительность процессора, в том числе для практически важного случая двумерного масштабирования комплексного РЛИ с одновременной компенсацией аффинных искажений, вызванных скосом ДНА.

### **6.6. Алгоритмы синтеза РЛИ в маршрутном режиме с учетом миграции дальности**

Получение близкого к метровому разрешения по азимуту в космических РСА связано с проблемой устранения миграции дальности при синтезе РЛИ. Как показано в разделе 6.4, эта проблема актуальна и в маршрутном режиме, но особенно в прожекторном режиме обзора, в котором применительно к космическим РСА кроме миграции дальности требуется еще и устранение неоднозначности сигналов по доплеровской частоте.

Синтезу РЛИ с учетом миграции дальности посвящено много публикаций [270, 274, 419, 421, 451, 504, 567]. В [274] дано систематизированное их изложение. Освоению представленного в ней материала значительно способствовало появление в Интернете демонстрационного программного пакета `SAP_TOOL` в среде `MATLAB`. Более поздняя публикация [567] снабжена Веб-приложением с `MATLAB`-программами. Аналогичный подход использован в лабораторном практикуме по РСА [155\*], где даны тексты `MATLAB`-программ (от `RC`-фильтрации до синтеза изображений РСА «Меч-КУ»), иллюстрирующие алгоритмы, приведенные в [160\*].

Детальный маршрутный режим можно рассматривать как частный случай прожекторного режима. В принципе, наиболее строгим из алгоритмов синтеза является, так называемый, алгоритм «обратной проекции» (`Backprojection`). Его суть состоит в том, что в каждой точке комплексного РЛИ в координатах наклонная

дальность-азимут накапливается сигнал от соответствующих точек радиоголограммы с учетом комплексных коэффициентов передачи. Однако этот алгоритм крайне неэффективен. Поиск эффективных алгоритмов при двумерной обработке данных состоит в использовании преимуществ быстрого преобразования Фурье в процедурах двумерной обработки данных – быстрой свертки с использованием БПФ. Для этого на предварительных этапах обработки устраняют миграцию дальности и зависимость азимутальной ЛЧМ от дальности.

На практике используют следующие основные *алгоритмы формирования РЛИ*:

1) преобразование данных к полярным координатам (PFA – Polar Format Algorithm);

2) коррекция миграции дальности (RMA – Range Migration Algorithm);

3) ЛЧМ-масштабирование (CSA – Chirp Scaling Algorithm).

Параметрами для сравнения эффективности алгоритмов формирования РЛИ являются:

1) число арифметических операций для формирования РЛИ;

2) требования по памяти;

3) возможность реализации алгоритмов обработки данных (например, цифровой фильтрации и БПФ) и требования к типу вычислительных средств;

4) качество получаемого РЛИ;

5) совместимость с дополнительными программами формирования РЛИ (например, автофокусировкой).

Особенностью ряда публикаций является то, что в них основное внимание уделяют самолетным РСА, для которых характерен большой диапазон углов азимута наблюдения и большое различие фокусов голограммы в пределах кадра. Для космических РСА, напротив, отношение полосы съемки (парциального луча для режима Скансар) к дальности центра кадра мало ( $\leq 2...3\%$ ), что надо учитывать при выборе алгоритма синтеза РЛИ.

В алгоритме преобразования данных к полярным координатам (PFA) основной операцией является преобразование данных из ортогонального формата – наклонная дальность  $R$  и время  $T$  в полярный формат – приращение наклонной дальности и доплеровская частота (пропорциональная углу отклонения линии визирования от нормали к вектору путевой скорости платформы). Эта операция значительно уменьшает зависимость закона азимутальной ЛЧМ от наклонной дальности, особенно для самолетных РСА с прямолинейной траекторией полета.

*Особенность алгоритма синтеза РЛИ с коррекцией миграции дальности (RMA) состоит в том, что коррекция миграции дальности производится в частотной области после одномерного БПФ по азимуту.* Это возможно потому, что законы миграции дальности для целей, смещенных по азимуту одинаковы. Коррекция выполняется путем двумерной фазовой компенсации сигнала после азимутального БПФ для целей, находящихся на средней дальности кадра. Для остальных дальностей коррекция оказывается частичной.

Следующий шаг – это, так называемое, *преобразование Столта*, которое одновременно компенсирует криволинейную составляющую миграции дальности путем «скручивания» принятых данных. Операция «скручивания», представляет со-

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

бой зависимое от азимутальной частоты растягивание масштаба сигнала по дальности. Она реализуется путем одномерного преобразования к новой координате  $K_Y$

$$K_Y = \sqrt{K_R^2 - K_X^2}, \quad (6.37)$$

где  $K_R, K_X$  – частотные составляющие спектров по дальности и азимуту.

Преобразование Столта реализуется с помощью цифровых интерполяционных фильтров, аналогичных используемым для преобразования данных в полярный формат. Последняя операция – это двумерное ОБПФ, в результате которого формируется комплексное РЛИ.

Упрощенная версия алгоритма обработки с коррекцией миграции дальности получила название ЛЧМ-масштабирования (CSA). В ней применяется аппроксимация преобразования Столта, не требующая интерполяции. Основные операции – БПФ и комплексное умножение обеспечивают высокую эффективность этого алгоритма, а при синтезе РЛИ космических РСА он, как правило, не уступает по точности алгоритму коррекции миграции дальности RMA. В крайнем случае, для уменьшения погрешности возможен синтез РЛИ с разделением полосы съемки на фрагменты.

Следует учесть, что в наземном процессоре синтеза изображений в РСА TerraSAR-X [264] для всех режимов съемки реализован унифицированный алгоритм, включающий на первом этапе процедуры CSA. Упрощенная структурная схема алгоритма ЛЧМ-масштабирования приведена на рис. 6.14. Работу алгоритма иллюстрирует рис. 6.15.

Входной сигнал представляет собой двумерную голограмму. Первой операцией алгоритма является преобразование Фурье (БПФ) по азимуту, в результате которого спектры целей, смещенных по азимуту и различающиеся только фазой, совпадают и накладываются друг на друга так, что к ним можно применить общую операцию коррекции миграции дальности. Закон миграции на практике достаточно близок к параболе, причем при представлении сигнала во временной области кривизна параболы уменьшается с наклонной дальностью, а в частотной области – возрастает (см. рис. 6.15). Для наглядности передние фронты принятых импульсов подчеркнуты. Кривизна миграции дальности в частотных каналах возрастает с наклонной дальностью.

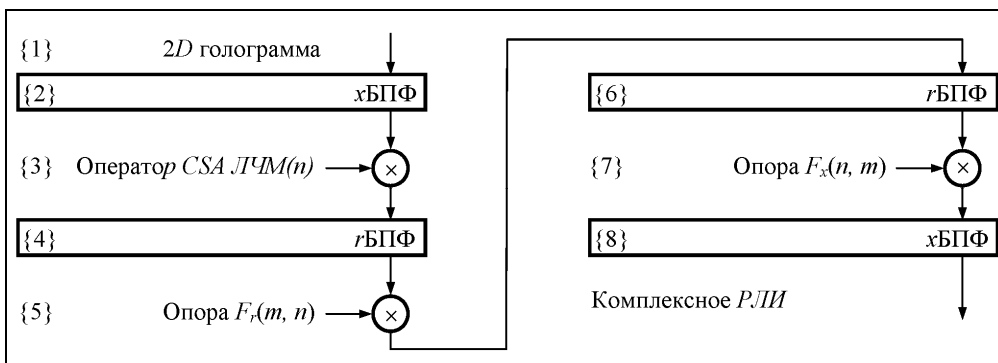
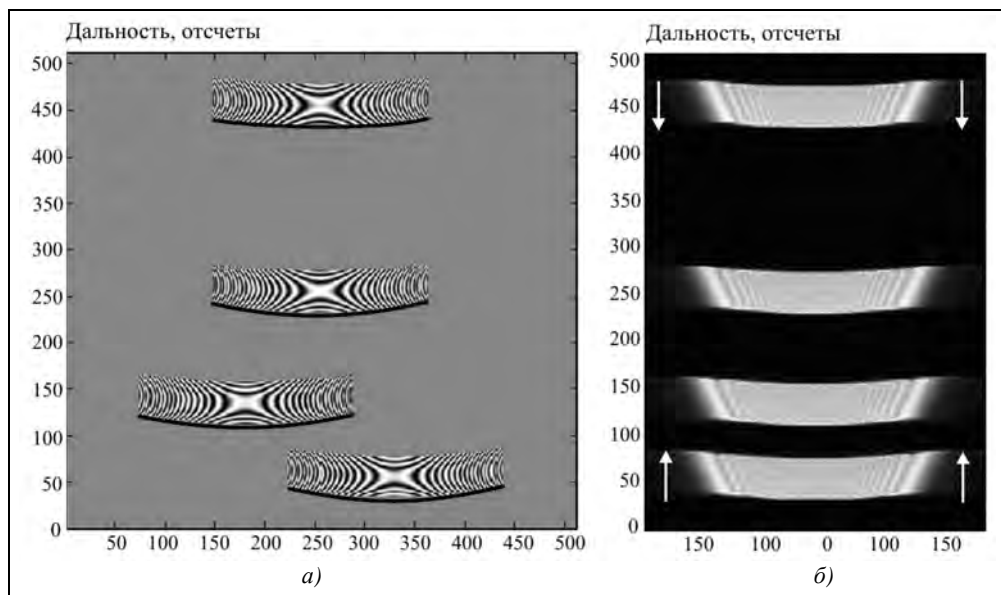


Рис. 6.14. Структурная схема алгоритма ЛЧМ-масштабирования CSA

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования



**Рис. 6.15.** Вид входной радиоголограммы для 4-х целей на разных дальностях и смещенные по азимуту (а) и центрированные спектры доплеровских частот радиоголограммы (б)

Следующая операция – умножение отсчетов в каждом спектральном канале (строке по дальности) на оператор ЛЧМ-масштабирования (CSA-оператор), который представляет собой ЛЧМ-процесс с нулями в центре кадра по дальности и с разной крутизной. В центральной строке дальности для  $n=0$ , крутизна ЛЧМ равна нулю. С увеличением номера  $n$  по модулю крутизна корректирующей ЛЧМ возрастает. В результате действия CSA-оператора нули ЛЧМ принятых сигналов от целей, удаленных от центра кадра, будут смещаться в направлении стрелок на рис. 6.15,б с тем, чтобы закон миграции дальности по азимуту был одинаков на всех дальностях, как для цели в центре кадра. Заметим, что такая процедура коррекции миграции дальности возможна только при использовании в РСА зондирующего сигнала с ЛЧМ.

Дальнейшие процедуры включают в себя умножение отсчетов (спектральных составляющих) в каждом частотном канале на ЛЧМ-опору и процедуру ОБПФ для сжатия сигнала по дальности. Далее следует умножение отсчетов азимутального спектра в каждом канале дальности на опорную функцию по азимуту и ОБПФ для получения комплексного РЛИ. Эти процессы иллюстрирует рис. 6.16.

Опорная функция  $F_r(m, n)$  сжатия сигнала по дальности имеет некоторые особенности. В нулевом доплеровском канале, где миграция дальности отсутствует, она в точности совпадает с комплексно сопряженным спектром зондирующего сигнала. По мере увеличения номера частотного канала  $n$  по модулю в опорную функцию вносится частотный сдвиг, который обеспечивает изменение временного положения сжатого импульса на величину миграции дальности в данном частотном канале для цели в центре кадра (а также всех других целей).

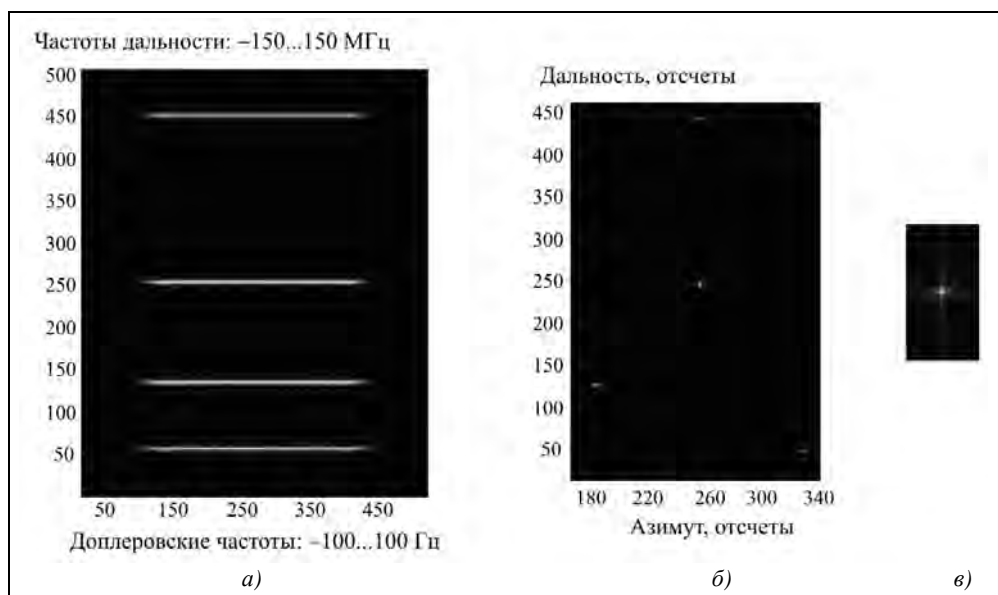


Рис. 6.16. Результат сжатия по дальности с коррекцией миграции (а), результат синтеза РЛИ (б), вид отклика на точечную цель (в)

Вторая особенность опорной функции  $F_r(m, n)$  состоит в том, что она должна компенсировать расфокусировку сжимаемого сигнала по дальности, вызванную ЛЧМ-множителем в CSA-операторе. В подробной структурной схеме процессора синтеза РЛИ, которая рассмотрена в разделе 6.7, опорная функция по дальности представлена тремя процедурами умножения: сжатие по дальности, вторичное сжатие по дальности для компенсации ЛЧМ в CSA-операторе и корректировка основной миграции дальности для центра кадра.

В ряде случаев, например, в режиме высокого разрешения РСА Radarsat-1 (режим *Fine*, разрешение 3 м) процедура вторичного сжатия может не требоваться [447].

Опорные функции в алгоритме синтеза с ЛЧМ-масштабированием рассчитывают на основе баллистических данных с преобразованием из временной области к частотной по азимуту. Для прямолинейного движения платформы, типичного для самолетных РСА, такие расчеты приведены в работах [231\*, 274], причем в [274] использован приближенный метод стационарной фазы [30]. Применительно к космическим РСА можно воспользоваться рассмотренной в гл. 5 аппроксимацией орбитального движения моделью прямолинейного движения с эквивалентной линейной скоростью  $V_{le}$ . При расчетах параметров компенсации миграции дальности погрешность не должна превышать  $(1/16...1/8)$  от элемента разрешения по дальности, что значительно мягче требований по точности вычисления фазы опорной функции синтеза РЛИ высокого разрешения. Поэтому можно воспользоваться первыми членами разложения временного закона изменения дальности в степенной ряд, представляя его параболой. В отличие от самолетного случая (постоянство путевой

скорости по дальности) – в космических РСА значения  $V_{le}$  меняются по дальности примерно по линейному закону.

Обозначим используемые в расчетах параметры соответствующими индексами, например:  $V_{le1}$  для первого пикселя РЛИ,  $V_{le0}$  – для центра кадра,  $V_{le2}$  – для последнего пикселя. Аналогичным образом будем обозначать наклонные дальности  $R_1, R_0, R_2$ , доплеровские частоты  $F_{Dop1}, F_{Dop0}, F_{Dop2}$  и другие параметры опорных функций. Для определенности примем, что нулевой отсчет по азимуту  $n=0$  соответствует целям с нулевой доплеровской частотой на всем интервале наклонных дальностей от  $R_1$  до  $R_2$ . Это означает, что при круговой орбите КА плоскость визирования проходит вдоль радиус-вектора КА и нормальна к вектору путевой скорости. Оси координат планового РЛИ на земной поверхности будут перпендикулярны. В общем случае эллиптической орбиты КА, влияние которой можно учесть составляющей вертикальной скорости, согласно формулам (5.97), (5.98), плоскость визирования наклоняется относительно надира, так что оси первичного РЛИ оказываются неперпендикулярными и это требует коррекции при построении планового РЛИ. Связь текущих параметров с номерами азимутальных отсчетов  $n$  определяется нижеследующими формулами. Для центра кадра имеем

$$R_0(n) \approx R_0 + \frac{V_{le0}^2 T_p^2}{2R_0} n^2, \quad (6.38)$$

$$F_{Dop0}(n) \approx \frac{2V_{le0}^2 T_p}{R_0 \lambda} n, \quad (6.39)$$

где  $n=0$  при  $F_{Dop0}(0)=0$  соответствует цели, удаленной от РСА на дальность  $R_0$  (минимальная «ближайшая» наклонная дальность цели при движении РСА).

Для начальной и конечной дальностей имеем аналогичные формулы.

После БПФ процесс преобразуется в частотную область с шагом по доплеровской частоте, равным  $F_p/M_{x\text{FFT}}$ , где  $M_{x\text{FFT}}$  – база БПФ по азимуту.

Для центра кадра имеем зависимость приращения дальности от номера частотного канала

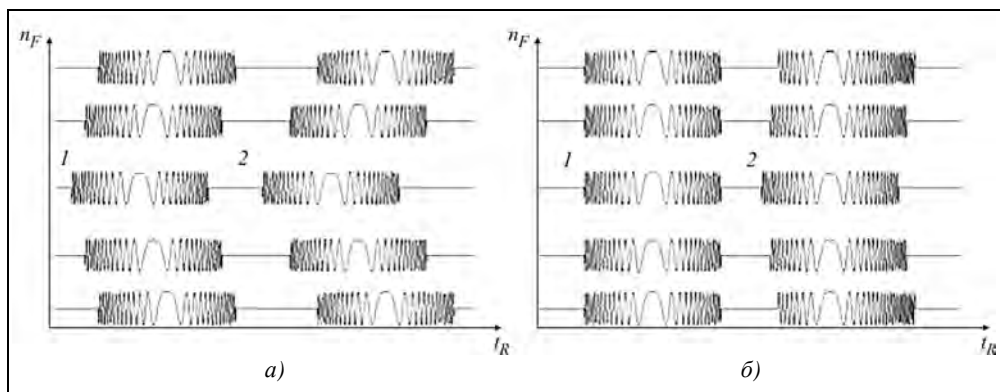
$$\Delta R_0(n_F) \approx \frac{R_0 \lambda^2}{8V_{le0}^2 T_p^2 M_{x\text{FFT}}^2} n_F^2; \quad -\frac{M_{x\text{FFT}}}{2} \leq n_F < \frac{M_{x\text{FFT}}}{2}. \quad (6.40)$$

Для начала и конца полосы съемки имеем разницу по отношению к центру кадра

$$\begin{aligned} \delta R_1(n_F) &\approx \frac{\lambda^2}{8T_p^2 M_{x\text{FFT}}^2} \left\{ \frac{R_1}{V_{le1}^2} - \frac{R_0}{V_{le0}^2} \right\} n_F^2; \\ \delta R_2(n_F) &\approx \frac{\lambda^2}{8T_p^2 M_{x\text{FFT}}^2} \left\{ \frac{R_2}{V_{le2}^2} - \frac{R_0}{V_{le0}^2} \right\} n_F^2. \end{aligned} \quad (6.41)$$

Устранение отличий законов миграции дальности от центра кадра достигается умножением строки дальности в каждом частотном канале на ЛЧМ-множитель. Этот процесс показан на рис. 6.17. В исходной картине, рассматриваемой в частот-

ной области, кривизна закона миграции дальности на границе кадра больше, чем в центре кадра (рис. 6.17, *a*). Выравнивание законов показано на рис. 6.17, *б* условно (скорректирована миграция дальности в центре кадра, что на практике реализуется на следующем шаге после CSA-оператора). Коррекцию разницы миграций осуществляют путем гетеродинирования сигнала на частоту, смещающую нуль ЛЧМ-сигнала в нужное положение, в котором окажется сжатый по дальности импульс. Огибающая при этом не смещается. Значение частоты гетеродинирования переменного по дальности с нулем для центра кадра и для линейного закона изменения миграции дальности по строке имеет вид ЛЧМ-процесса.



**Рис. 6.17.** Коррекция частотной зависимости миграции дальности для центра кадра и дальней границы полосы съемки:

*a* – исходная картина для центра кадра (1) и для дальней границы (2); *б* – устранение разницы миграции на границе (2) по отношению к центру кадра (1); изменяется положение нулевой частоты сигнала, а в огибающей сигнала миграция остается

Параметры гетеродинирующего ЛЧМ-процесса находят с учетом следующих соображений. Производная наклонной дальности по частоте ЛЧМ-процесса зондирующего сигнала выражается через длительность импульса  $\tau$  и полосу зондирующего сигнала  $\Delta F$ :

$$\frac{dR_\tau}{dF} = \frac{c\tau}{2\Delta F}, \quad (6.42)$$

откуда корректирующая частота равна

$$F_{\text{кор}} = \frac{2\Delta F \delta R_\tau}{c\tau}, \quad (6.43)$$

а крутизна ЛЧМ для  $F_{\text{кор}}$ , в предположении, что центр кадра равноудален от границ, равна

$$\frac{dF_{\text{кор}}}{dt} = \frac{\delta Fc}{2(R_2 - R_1)}. \quad (6.44)$$

Аналогичным образом по формулам (6.42), (6.43) рассчитывают гетеродинирующую частоту для коррекции миграции дальности в каждом частотном канале. Поскольку законы миграции выровнены, гетеродинирующая частота постоянна для



каждой строки дальности. В результате получаем опорную функцию сжатия сигнала по дальности в каждом частотном канале, которая является произведением трех составляющих: основной, комплексно сопряженной с ЛЧМ зондирующим сигналом (и с учетом поправки на доплеровский эффект на краях азимутальной ДНА), ЛЧМ-гетеродинирования для выравнивания законов миграции по полю кадра и частоты, корректирующей основную миграцию дальности для центра кадра.

Заметим, что на спектр отраженного ЛЧМ-сигнала после преобразования радиолограммы из временной в частотную область влияет доплеровское смещение частоты – его крутизна ЛЧМ уменьшается в соответствии с формулой [231\*, 274, 419]

$$\frac{dF_r(F_{\text{Dop}}, R_0)}{dt} = \left\{ \frac{\tau}{\Delta F} + R_0 \frac{2\lambda}{c^2} \frac{\left( \frac{\lambda F_{\text{Dop}}}{2V_{\text{le}}} \right)}{\left( 1 - \left( \frac{\lambda F_{\text{Dop}}}{2V_{\text{le}}} \right)^2 \right)^{3/2}} \right\}^{-1}. \quad (6.45)$$

Однако это явление, характеризующее вторым членом в формуле (6.45), в основном, сказывается при больших угловых интервалах радиолограммы по азимуту, что нетипично для космических РСА.

При выборе амплитудного распределения опорной функции сжатия по дальности следует руководствоваться известными соображениями по снижению уровня боковых лепестков (аподизация функциями косинус на пьедестале, Хемминга, Кайзера и др. [2, 168, 229]), а также необходимостью ограничить ширину спектра обработки на краях импульсов, где нет полного перекрытия этих импульсов по всем азимутальным каналам. Поскольку различия законов миграции по полю кадра невелики, потерями в разрешающей способности и потенциале РСА при применении алгоритма CSA можно пренебречь.

Суммарное воздействие составляющих коррекции миграции дальности может привести к тому, что в каждом канале дальности после сжатия появятся погрешности по фазе, которые подлежат компенсации перед сжатием по азимуту. Заключительная операция синтеза РЛИ – сжатие по азимуту не отличается от случая без миграции дальности, рассмотренного выше.

### **6.7. Особенности принимаемых сигналов в прожекторном режиме съемки**

При работе в *прожекторном режиме* съемка ведется кадрами, при этом луч антенны все время поворачивают по азимуту в направлении снимаемого района. Длительность кадра съемки определяется временем наблюдения, которое можно полностью использовать для синтеза апертуры (когерентного накопления) и реализовать наилучшее разрешение по азимуту при одном наблюдении либо разделить на несколько субапертур, реализовывать в них синтез РЛИ (с пониженным разрешением), но выполнить некогерентное накопление нескольких независимых наблюдений для улучшения радиометрического разрешения.

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Возможны несколько вариантов реализации прожекторного режима:

1) строго боковой обзор, при котором нуль доплеровской частоты находится в середине апертуры синтеза;

2) скошенный прожекторный обзор с малым углом скоса в апертурах, соседних с центральной апертурой (при нечетном числе апертур, а при четном – относительно середины интервала наблюдения);

3) скошенный прожекторный обзор с малыми или большими углами скоса при съемке объектов на разной дальности с упреждением или задержкой;

4) прожекторный обзор «с протяжкой», когда в начале съемки луч антенны направляют с упреждением на  $1/2$  ширины ДНА относительно центра снимаемого участка. Угловую скорость поворота луча выбирают такой, чтобы в конце съемки максимум луча отставал от центра кадра на  $1/2$  ширины ДНА. Таким методом можно расширить азимутальный размер кадра в  $1,5...2$  раза по отношению к ширине зоны облучения по азимуту.

По сравнению с рассмотренным ранее маршрутным режимом при наличии миграции дальности **прожекторный режим имеет ряд особенностей:**

- большой диапазон изменений доплеровской частоты в апертуре синтеза;
- значительное увеличение миграции дальности;
- шаг отсчетов принимаемого сигнала по азимуту, определяемый периодом повторения, значительно больше, чем реализуемое азимутальное разрешение. Для правильного воспроизведения получаемого РЛИ необходима интерполяция периода повторения в число раз, равное отношению длины апертуры к ширине зоны, облучаемой азимутальной ДНА.

*Главное отличие прожекторного режима в космических РСА от маршрутного режима состоит в том, что диапазон изменения доплеровской частоты целей за время синтеза в несколько раз превышает ширину спектра доплеровских частот и частоту повторения зондирующих сигналов. В результате строб-эффекта доплеровская частота принимаемого сигнала не превышает по модулю  $1/2$  от частоты повторения. Поскольку луч антенны подсвечивает один и тот же участок местности по азимуту, это явление не приводит к неоднозначности сигналов, но требует восстановления истинного значения доплеровской частоты для синтеза РЛИ.*

В литературе отмечается близость явлений, касающихся миграции дальности и алгоритмов ее коррекции для всех основных режимов работы РСА. Отмечается близость прожекторного режима и режима Скансар в алгоритмах азимутальной обработки радиоголограммы [357, 409, 410, 420, 486]. Процессы формирования радиоголограммы в прожекторном режиме рассматриваются на рис. 6.18. Рассмотрены временные зависимости частоты сигналов от трех целей  $A$ ,  $B$  и  $C$ , попадающих в зону облучения антенной радиолокатора по азимуту. Приведены временные графики доплеровского смещения частоты сигналов  $F_A$ ,  $F_B$  и  $F_C$  за время наблюдения  $T_{\text{synt}}$ , которое определяет апертуру синтеза.

Для сравнения на рис. 6.18, б приведены временные зависимости частоты сигналов в режиме Скансар. Ширина спектра доплеровских частот, принимаемого антенной радиолокатора в режиме Скансар, определяется путевой скоростью и го-

горизонтальным размером антенны  $\Delta F_{\text{ant}} = 2V_{\text{sg}}/D_{\text{xant}}$ . В прожекторном режиме эта величина соответствует «мгновенному» спектру принимаемого сигнала.

На рис. 6.18, а показан результат дискретизации полного диапазона доплеровских частот  $\Delta F_{\text{synt}}$  сигнала частотой повторения зондирующих сигналов. Действие строб-эффекта приводит к тому, что принимаемые частоты сигналов  $F_{rA}$ ,  $F_{rB}$  и  $F_{rC}$  ограничены значениями от минус  $F_p/2$  до  $F_p/2$ . Это явление вызывает азимутальную неоднозначность. Для ее устранения записанную радиоголограмму (апертуру синтеза) разделяют на  $N$  субапертур для частичной обработки в однозначной области, после чего формируют суммарную апертуру для сжатия по азимуту.

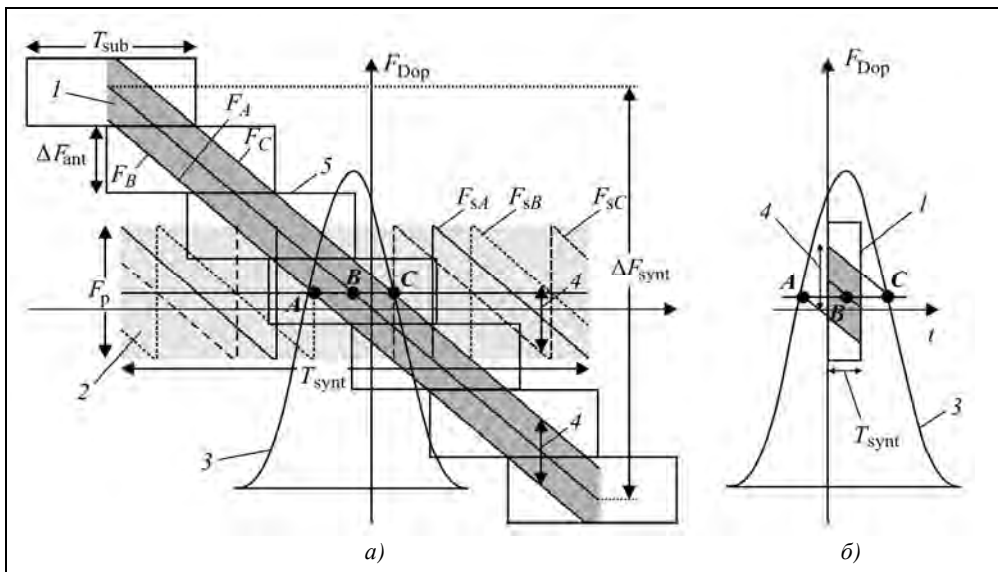


Рис. 6.18. Временные зависимости доплеровских частот в радиоголограмме прожекторного режима (а) и для одного кадра режима Скансар (б):

1 – доплеровское смещение в отраженном сигнале от целей А, В, С; 2 – доплеровские частоты в выходной цифровой радиоголограмме (ЦРГ), дискретизированные периодом зондирования  $T_p$ ; 3 – форма азимутальной ДНА, ограничивающая ширину «мгновенного» спектра доплеровских частот; 4 – «мгновенная» полоса спектра доплеровских частот  $\Delta F_{\text{ant}}$ ; 5 – субапертуры, используемые для восстановления азимутальной однозначности сигналов в прожекторном режиме

**Близость прожекторного режима и режима Скансар** характеризуется следующими факторами:

- выходные РЛИ формируют цели, попадающие в азимутальную ДНА при постоянном направлении луча, относительно траектории полета (режим Скансар) или при сканировании луча в направлении участка наблюдения (прожекторный режим);
- для синтеза РЛИ можно использовать алгоритмы, применяемые для маршрутного режима, однако они неэффективны из-за необходимости интерполяции с приведением шага отсчетов РЛИ к требуемому азимутальному разрешению;

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

- начало и конец записи данных одинаковы, независимо от дальности целей. Это позволяет в обоих случаях применить для синтеза РЛИ эффективный алгоритм гармонического анализа (SPECAN);
- характер сигнала в каждой субапертуре прожекторного режима практически совпадает с принимаемым сигналом в кадре режима Скансар. На рис. 6.18, б показана апертура синтеза  $T_{\text{synt}}$  в режиме Скансар при строго боковом обзоре, когда луч антенны радиолокатора направлен по нормали к вектору путевой скорости платформы. При  $t=0$  доплеровская частота для цели  $B$ , находящейся по нормали к траектории равна нулю. Такой же характер имеет сигнал в центральной субапертуре прожекторного режима, показанной на рис. 6.18, а. В соседних субапертурах ширина спектра принимаемых сигналов сохраняется, однако средняя доплеровская частота отличается от нуля и компоненты спектра могут перемещаться по частотным каналам, переходя через границы  $\pm F_p/2$  по кольцу. Аналогично это происходит и в режиме Скансар при скошенном обзоре, например, при ориентации платформы в орбитальной системе координат (ОСК).

Исходя из рассмотренного выше поведения спектра сигналов в субапертурах для обеспечения однозначности сигналов в каждой из них, число субапертур должно быть не менее

$$N_{\text{sub}} \geq \frac{\Delta F_{\text{synt}} + \Delta F_{\text{ant}}}{\Delta F_{\text{ant}}}, \quad (6.46)$$

где  $\Delta F_{\text{ant}} \approx \frac{2V_{\text{sg}}}{D_{\text{xant}}}$  – ширина «мгновенного» спектра сигнала, определяемого азимутальной ДНА;  $\Delta F_{\text{synt}}$  – полная полоса доплеровских частот обрабатываемого сигнала.

При этом для исключения краевых эффектов необходимо наложение соседних субапертур, а их длительность должна соответствовать полосе доплеровских частот, равной частоте повторения  $F_p$  с запасом на перекрытие на ширину спектра сигналов

$$T_{\text{sub}} \approx \frac{F_p + \Delta F_{\text{ant}}}{F'_{\text{Dop}}} = \frac{T_{\text{synt}} (F_p + \Delta F_{\text{ant}})}{\Delta F_{\text{synt}}}, \quad (6.47)$$

где  $F'_{\text{Dop}} = \frac{\Delta F_{\text{synt}}}{T_{\text{synt}}} = \frac{2V_{\text{sg}}^2}{R\lambda}$  – скорость азимутальной ЛЧМ.

Для исключения азимутальной неоднозначности может оказаться необходимым увеличить размеры субапертур с заполнением добавленных отсчетов нулями, как это было рассмотрено в подразделе 6.5.2. Предполагается квадратичная зависимость фазы принятого сигнала по времени. Отклонения от этого закона учитываются при формировании субапертур. При выборе размера субапертуры возможно уменьшить погрешности, вызванные малой разрядностью фазовращателей в приемопередающих модулях АФАР радиолокатора, если учесть дискретность азимутальных положений луча [264, 408].

## 6.8. Унифицированный алгоритм синтеза изображения в основных режимах работы РСА

В материалах [264, 357, 409, 410, 420] рассмотрены вопросы унификации алгоритмов синтеза РЛИ в основных режимах работы космических РСА: маршрутном, прожекторном и режиме Скансар. Структурная схема такого алгоритма приведена на рис. 6.19. Она содержит три функциональных блока, помещенных в пунктирные рамки: сжатия по дальности с коррекцией миграции дальности (процедуры {2}...{12} для всех режимов работы), сжатия по азимуту для прожекторного режима и режима Скансар (процедуры {13}...{21}) и для маршрутного режима (процедуры {23}...{24}). На схеме процедуры, применяемые только в прожекторном режиме, помещены в двойную рамку, для режима Скансар – в пунктирную рамку, а процедуры, используемые только в маршрутном режиме, обозначены серым фоном.

Входной операцией унифицированного алгоритма является амплитудное взвешивание радиоголограммы по азимуту для уменьшения уровня боковых лепестков выходного отклика РСА. Поскольку в прожекторном и режиме Сансар длительность радиоголограммы одинакова для всех дальностей эта операция выполняется простым умножением матрицы входных отсчетов на весовую функцию.

Далее, только для прожекторного режима, следует формирование субапертур {3}. В каждой из субапертур (для режима Скансар – в апертуре) после азимутального БПФ {4} выполняют стандартную последовательность процедур {5}...{12} для коррекции миграции дальности путем ЛЧМ-масштабирования по дальности. Используемый алгоритм ESC (Extended Chirp Scaling) является расширенной модификацией алгоритма CSA.

После коррекции миграции дальности (процедура {12}) приступают к азимутальной обработке. Для прожекторного режима и режима Скансар выполняют масштабирование по азимуту {13}, которое преобразует реальный (для орбитального полета) закон изменения фазы по субапертуре (апертуре) в квадратичный, одинаковый для всех дальностей. Проводят амплитудную коррекцию {14} радиометрических искажений, вызванных формой азимутальной ДНА, что особенно важно для режима Скансар. В прожекторном режиме радиометрическую коррекцию можно сделать на последнем этапе синтеза РЛИ.

Следующая операция – преобразование данных во временную область по азимуту путем  $\chi$ ОБПФ {15}, в результате чего образуются двумерные субапертуры (дальность–азимут) для сборки полной апертуры, подлежащей сжатию по азимуту. По существу, если бы использовался простой зондирующий сигнал в виде коротких импульсов, отсутствовала миграция дальности и не было зависимости азимутальной ЛЧМ от наклонной дальности, то такие субапертуры могли быть получены из исходной радиоголограммы путем простой нарезки. Особенность этих субапертур состоит в том, что в них одинаковые законы ЛЧМ, ширина и положение спектров доплеровских частот, что обеспечено процедурой частотного масштабирования и центрирования {13}.

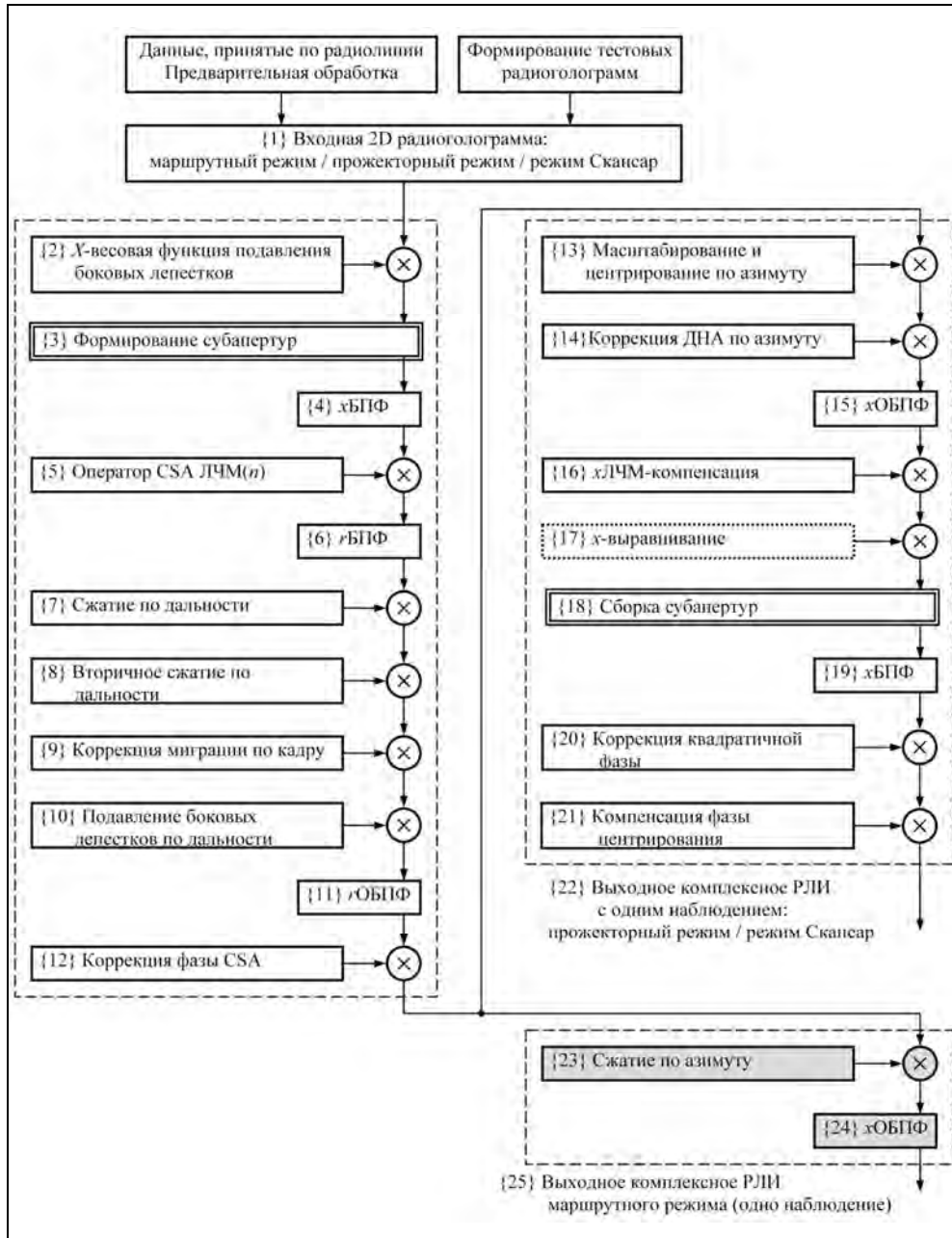


Рис. 6.19. Схема унифицированного алгоритма синтеза РЛИ в маршрутном, прожекторном режимах и режиме Скансар

Умножая каждую из субапертур на ЛЧМ-множитель (первая операция гармонического анализа {16}), получим непрерывную последовательность фрагментов азимутального процесса (за исключением краевых явлений в областях перекрытия) для сборки полной апертуры. Диапазон доплеровских частот в каждом фрагменте лежит в пределах  $\pm F_p/2$ . После сборки субапертур {18} и операции хБПФ {19} получаем выходное комплексное РЛИ {22} с шагом отсчетов по азимуту в  $N$  раз меньшим, чем в исходной радиоголограмме. Это позволяет передать без пропусков РЛИ с разрешающей способностью, соответствующую полной апертуре прожекторного режима.

В режиме Скансар перед хБПФ следует операция {17}, выравнивающая шаг отсчетов в выходном РЛИ (частотное масштабирование по азимуту).

Заключительные операции: коррекция квадратичного закона изменения фазы {20}, и компенсация фазы {21}, вызванной масштабированием по азимуту и центрированием {13}, необходимы для того, чтобы получаемые комплексные РЛИ прожекторного режима и режима Скансар были пригодны для интерферометрической обработки данных.

Для режима Скансар комплексные РЛИ, полученные в разных кадрах парциальной зоны по дальности можно комбинировать для некогерентного накопления с целью повышения радиометрического разрешения (амплитудные РЛИ с несколькими наблюдениями) или уменьшения фазовых ошибок для интерферометрической обработки. Парциальные РЛИ, полученные в режиме Скансар в разных парциальных лучах по углу места, требуют сшивки в единое РЛИ. Поскольку в разных лучах частоты повторения, как правило, различны, их приводят к единой шкале при масштабировании по азимуту {13}.

Кроме рассмотренного выше алгоритма синтеза РЛИ в работе [569] приведен вариант алгоритма для случая аналоговой компенсации азимутальной ЛЧМ электронным методом до АЦП (Dechirp on Receive), который может применяться для бортового синтеза РЛИ при ограниченных ресурсах вычислительных средств. В нем на первом этапе алгоритма синтеза РЛИ используют масштабирование сигналов по доплеровской частоте, для чего добавлены модуль коррекции фазы и  $r$ ОБПФ между процедурами {6} и {7}, а также модифицирован ряд процедур {5}, {7}, {12}.

В маршрутном режиме для сжатия по азимуту используют классический алгоритм быстрой свертки, включающий умножение спектра доплеровских частот на опорную функцию {22} и ОБПФ {23}. Эти операции, идентичные приведенным на рис. 6.10, обеспечивают получение РЛИ с равномерным шагом во всем интервале наклонных дальностей, который определяется длиной отрезка на земной поверхности, между двумя периодами зондирования (масштаб РЛИ вдоль линии пути).

Расчет опорных функций для выполнения операций, входящих в алгоритм синтеза, можно вести с использованием аналитических формул, связывающих параметры временных и частотных процессов. Другой путь состоит в расчете временных законов изменения фазы сигнала от точечных целей в интервале наклонных дальностей наблюдения при относительном движении платформы (орбитальное движение и вращение Земли). Параметры сигналов в частотной области опре-

деляют путем численного выполнения операций БПФ с размерностями базы, выбранными при проектировании процессора обработки сигналов РСА.

## 6.9. Алгоритм синтеза РЛИ в прожекторном режиме с когерентным накоплением в субкадрах

### 6.9.1. Интерполяция радиоголограммы по азимуту

В качестве альтернативы субапертурной обработке сигналов в прожекторном режиме предложен алгоритм синтеза РЛИ, в котором сначала устраняется неоднозначность сигналов по азимуту с формированием большой, интерполированной на высокую частоту повторения апертуры, а затем происходит ее преобразование в короткую апертуру (равную числу исходных азимутальных отсчетов радиоголограммы) с применением алгоритма быстрой свертки по азимуту [137\*, 138\*]. Схема алгоритма приведена на рис. 6.20.

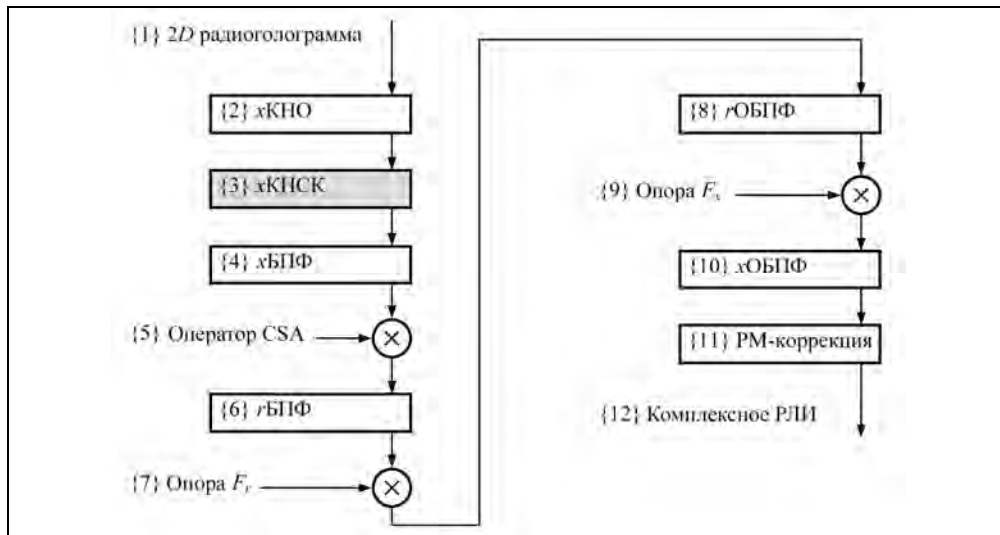


Рис. 6.20. Схема алгоритма синтеза РЛИ в прожекторном режиме с когерентным накоплением в субкадрах

В отличие от маршрутного в прожекторном режиме азимутальная диаграмма не участвует в амплитудном взвешивании по апертуре, а просто уменьшает уровень сигнала на краях кадра. Радиометрическая коррекция в опоре на шаге {9} устраняет этот эффект.

Входной сигнал {1} представляет собой двумерную голограмму. На шаге {2} xКНО устраняется типичная для прожекторного режима неоднозначность сигналов по азимуту. На выходе этого шага получается голограмма, интерполированная на повышенную частоту повторения  $F_{mp}=mF_p$ . Ее период повторения, соответственно,  $T_{mp}=1/F_{mp}$  в  $m$  раз меньше шага голограммы  $T_p$ . Дальнейший процесс рассмотрим без операции {3} когерентного накопления субкадров (xКНСК). Последовательность



шагов {4}...{8} обычная для CSA (показана без подробностей, представленных на рис. 6.19). Далее следуют оставшиеся операции сжатия по азимуту методом быстрой свертки – умножение на опорную функцию {9} и ОБПФ {10}, радиометрическая коррекция формы ДНА по углу места и азимуту {11}, после чего формируется комплексное радиолокационное изображение {12}. На шагах {7} и {9} реализуется амплитудное взвешивание спектров для получения отклика с малыми боковыми лепестками и, при необходимости, коррекция фазы сигнала по данным автофокусировки.

В рассмотренном алгоритме синтеза РЛИ прожекторного режима специфической процедурой является компенсация азимутальной неоднозначности xКНО {2}. Структурная схема алгоритма xКНО, представленная на рис. 6.21, включает компенсацию фазы для центра кадра – умножение на ЛЧМ-опору 1 {2.1} с последующей интерполяцией процесса путем азимутального БПФ {2.2}, раздвижки спектра {2.3} и ОБПФ {2.4}. После этого выполняется обратное гетеродинирование – умножение на опору 2 {2.5} с восстановлением фазы на интерполированной частоте повторения. Возможное дальнейшее продолжение операции синтеза РЛИ – выполнение шагов {4}...{12} согласно структурной схеме на рис. 6.20.



Рис. 6.21. Процесс интерполяции голограммы на повышенную частоту повторения

### 6.9.2. Когерентное накопление парциальных спектров

Существенный недостаток алгоритма синтеза с интерполяцией голограммы – явная несоразмерность огромного массива голограммы и малой сцены наблюдения. Вместо рассмотренных ранее алгоритмов синтеза РЛИ с обработкой сигнала по субапертурам предложен метод когерентного накопления парциальных спектров, полученных в последовательных субкадрах интерполированной голограммы [140\*, 431\*]. Отличие «субапертур» от «субкадров» в том, что субкадры содержат полную апертуру синтеза РЛИ с числом отсчетов, равным числу отсчетов входной радиоголограммы. Структурная схема алгоритма показана на рис. 6.22. Она включает в себя разделение интерполированной радиоголограммы на субкадры {4.1}, xБПФ {4.2} в каждом субкадре и суммирование парциальных спектров {4.3}. Затем следуют шаги {4}...{12} структурной схемы, приведенной на рис. 6.20.

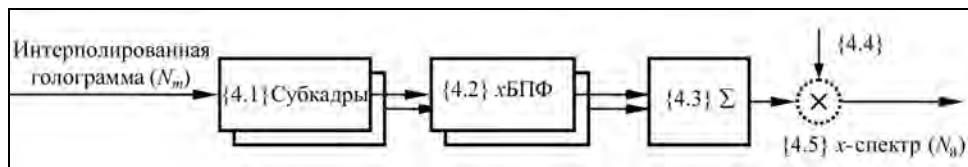
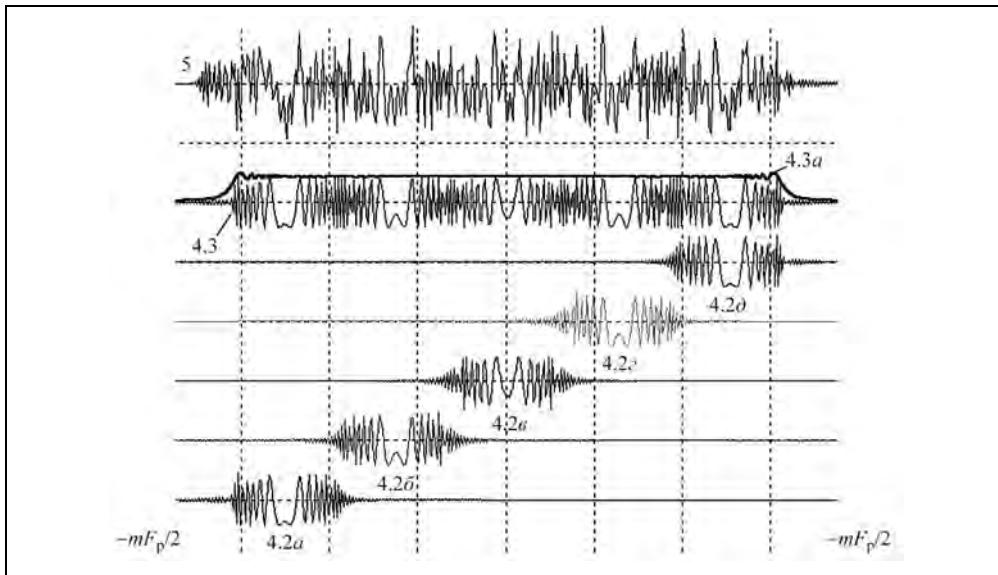


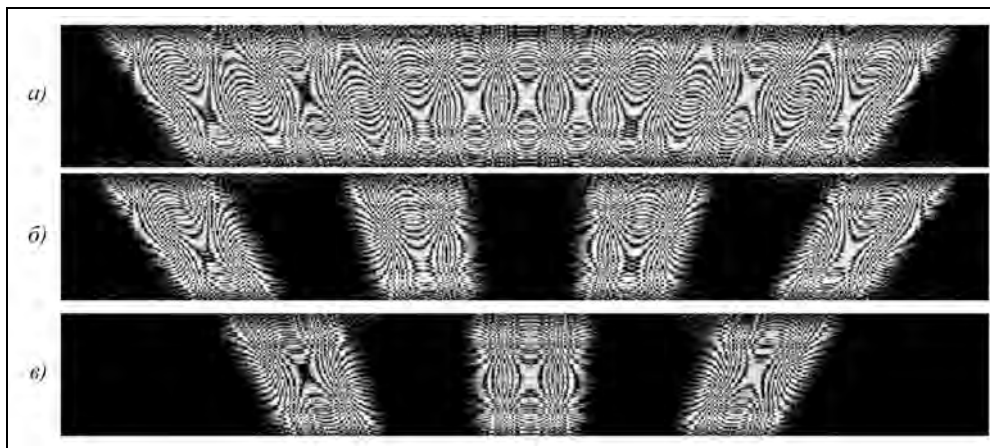
Рис. 6.22. Структурная схема когерентного накопления парциальных спектров

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Парциальные спектры, вычисленные в отдельных субкадрах по азимуту, разнесены по доплеровской частоте без пересечения их существенных областей. При суммировании происходит их стыковка в сплошной спектр. На рис. 6.23 показано формирование накопленного спектра от точечной цели (опорная функция, кривая 4.3) и от модели входного сигнала из трех целей (кривая 5). Спектр точечной цели служит опорой в алгоритме фильтрации по азимуту. На рис. 6.24 показаны двумерные суммы парциальных спектров по четным и нечетным субкадрам и суммарный спектр.



**Рис. 6.23.** Формирование когерентно накопленных спектров:  
4.2a–4.2d – накопление парциальных спектров точечной цели (действительные составляющие);  
4.3 – спектр опоры; 4.3,a – огибающая спектра опоры; 5 – накопленный спектр сигнала



**Рис. 6.24.** Когерентное накопление двумерных парциальных спектров:  
a – сумма четных субкадров; б – сумма нечетных субкадров; в – суммарный спектр

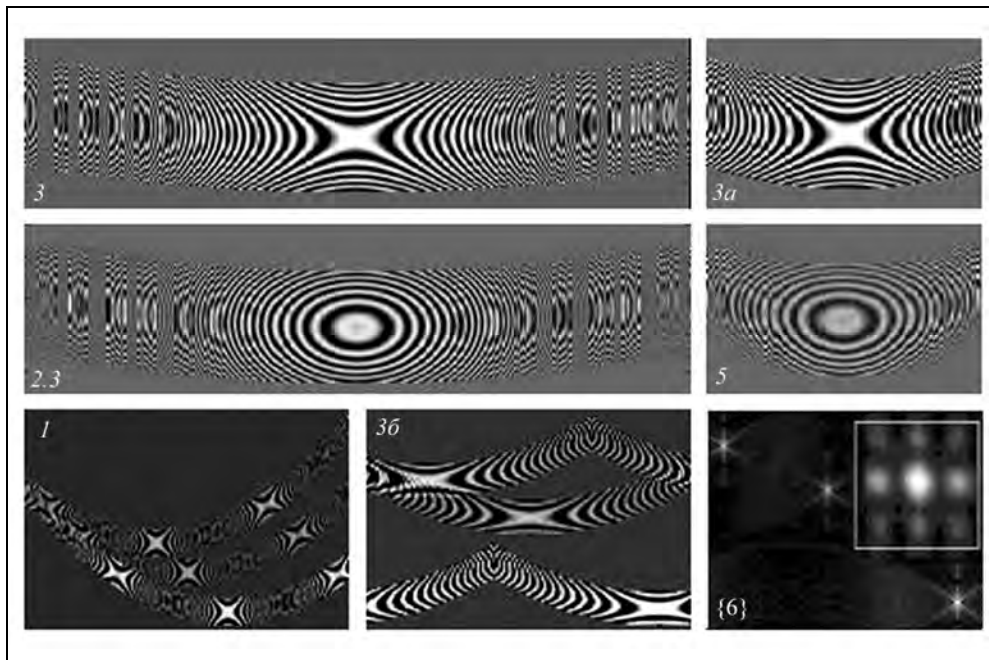
Предложена модификация алгоритма синтеза, в котором вводится дополнительное умножение азимутального спектра (поз. {5} на рис. 6.23) на функцию {4.4} (см. рис. 6.22), являющейся произведением двух сомножителей

$$K_{FX}^{(4,4)}(n_x, n_r) = \text{conj}(H_x^{(4,3)}(n_x, n_r)) \cdot \exp(j\phi(n_m T_{mp}, n_r) m), \quad (6.48)$$

где первый сомножитель компенсирует фазу опоры {4.3}, вызванную применением хБПФ на малой базе субкадров, а второй множитель вводит квадратичную фазу с крутизной ЛЧМ в  $m$  раз большей, чем у интерполированного сигнала, но на базе, равной базе субкадров.

В результате этой операции спектр голограммы, сохраняя канонический вид ЛЧМ, «сжимается» в  $m$  раз, увеличивая крутизну ЛЧМ с сохранением полосы доплеровских частот на числе отсчетов  $N_m$ . Вид голограмм и спектров показан на рис. 6.25.

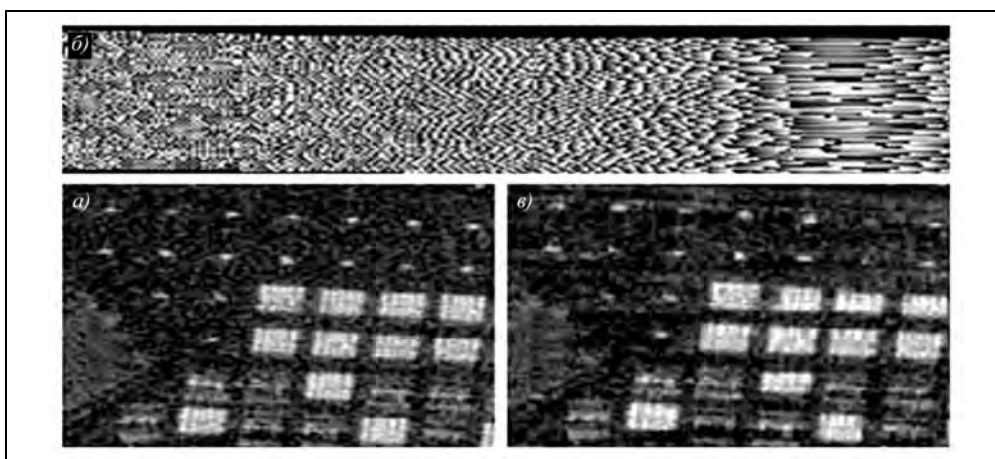
Преимущества предложенных алгоритмов синтеза изображения по сравнению с разделением на субапертуры исходной голограммы без ее интерполяции состоят в том, что снижаются потери, вызванные «нарезанием» входного сигнала, спектр оказывается более «чистым». Сохранение вида ЛЧМ в модифицированном алгоритме позволяет унифицировать алгоритмы синтеза в прожекторном и маршрутном режимах.



**Рис. 6.25.** Преобразования сигналов при синтезе изображения:

исходная радиоголограмма прожекторного режима от трех целей на разных азимутах и дальностях (1); спектр (2.3) и интерполированная радиоголограмма (3) от одной цели; радиоголограмма от одной цели (3а) и ее спектр (5), приведенные к исходной базе и являющиеся опорной функцией; радиоголограмма от трех целей (3б) и полученное по ней радиолокационное изображение {6}

На рис. 6.26 представлены результаты моделирования. Исходный сюжет – фрагмент радиолокационного снимка солнечной энергетической установки фирмы Sandia с разрешением 0,3 м [531]. По сформированной радиоголограмме получено изображение с разрешением около 1 м.



**Рис. 6.26.** Результаты моделирования синтеза РЛИ в прожекторном режиме методом когерентного накопления парциальных спектров:  
*а* – исходное РЛИ; *б* – радиоголограмма; *в* – результат моделирования

### **6.9.3. Когерентное накопление субкадров**

Возможно некоторое упрощение алгоритма синтеза РЛИ в прожекторном режиме, основанного на когерентном накоплении субкадров. Как следует из рис. 6.24, спектры фрагментов интерполированной радиоголограммы, полученные в разных субкадрах, не перекрываются. Это означает, что сигналы в разных субкадрах имеют разные средние частоты и, будучи наложены друг на друга в одном общем временном интервале (субкадре), после спектрального анализа займут разные частотные каналы. В результате они сформируют непрерывный спектр, показанный на рис. 6.24,в. Для реализации этого алгоритма в структурной схеме, показанной на рис. 6.22, нужно процедуру суммирования {4.3} поставить перед БПФ {4.2}. Это позволит сократить требуемое число операций БПФ до одной (вместо равного числа субкадров, но на меньшей базе). Теоретическое обоснование алгоритмов синтеза РЛИ, рассмотренных в данном разделе, приведено в работе [140\*].

## **6.10. Автофокусировка радиолокационных изображений**

### **6.10.1. Искажающие воздействия, требующие применения автофокусировки РЛИ**

В теории антенн детально проработаны вопросы влияния апертурных искажений на форму диаграммы направленности антенны. Разработанные методы анализа могут быть применены и к синтезированной апертуре. Отличие радиолокаторов с синтезированной антенной состоит в том, что они являются динамическими систе-

мами, в которых искажающие факторы могут иметь меняющийся по времени случайный характер с неизвестными параметрами. Для их компенсации могут быть использованы методы «слепой» обработки (blind signal processing) [59], основанной на анализе информации, заложенной в принимаемом сигнале. В общем случае следует рассматривать искажения и нестабильности фазы, а также амплитудные нестабильности, вызванные, например, ошибками управления лучом антенны в прожекторном режиме, которые могут приводить к появлению ложных лепестков синтезированной ДНА. Механизмы компенсации искажений различны. Влияние фазовых искажений значительно больше амплитудных и их устранение возможно при использовании автофокусировки.

**Основными источниками искажений распределения фазы по апертуре синтеза в космических РСА** с высокой разрешающей способностью являются:

- траекторные искажения, обусловленные погрешностями измерения параметров движения КА (гринвичских координат, векторов скорости и ускорения) в гравитационном поле Земли с учетом возмущающих воздействий (притяжения Луны, Солнца, солнечного ветра и др.). Имеют влияние особенности геометрии орбитального движения и вращения Земли относительно объекта наблюдения (эллиптические орбиты, высота рельефа земной поверхности);
- аппаратные искажения и нестабильности при формировании зондирующих сигналов, их усилении, прохождении через приемный тракт, преобразовании в цифровую форму и обработке для получения радиолокационных изображений;
- искажения и нестабильности в трассе распространения сигнала на участке синтеза, рассмотренные в разделе 2.2 гл. 2 – тропосферные нестабильности, проявляющиеся в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн, и ионосферные нестабильности, влияние которых начинает сказываться от длин волн 23 см [488], весьма существенно в *P*-диапазоне волн ( $\lambda = 68$  см) и огромно на метровых волнах, входящих в частотный диапазон зондирующего сигнала видеоимпульсных РСА;
- нестабильности, вызванные движением наблюдаемых объектов, – линейной скоростью, ускорениями, колебательным движением (морская поверхность, качка кораблей и др.), хаотическими движениями (растительность при ветровых воздействиях);
- искажения и нестабильности, возникающие при многопозиционном радиолокационном зондировании.

При анализе влияния перечисленных факторов на синтез РЛИ целесообразно различать *искажения* и *нестабильности*. В отличие от самолетных РСА, в которых траекторные нестабильности являются основным деструктивным фактором, в космических РСА орбитальное движение носит регулярный характер с постоянством отклонений, по крайней мере, для локального участка наблюдения. Для них синтезированная апертура может быть уподоблена конформной антенне со сложной, но постоянной геометрией, для описания которой может оказаться недостаточной точность датчиков траекторных измерений и аппаратуры позиционирования (GPS, ГЛОНАСС). Но при этом по параметрам принимаемого сигнала имеется возмож-

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

ность решить (или уточнить) уравнение движения фазового центра антенны радиолокатора относительно трехмерной поверхности наблюдаемой сцены. В этом и состоит задача автофокусировки при синтезе РЛИ. Наличие других искажающих воздействий, а также нестабильностей делает эту задачу менее определенной, но, как показывает опыт эксплуатации космических РСА, получение выходной радиолокационной информации, пригодной для практического применения, обеспечивается.

**Ошибки измерения параметров, определяющих зависимость фазы сигнала от времени** (ошибки фокусирования), **приводят к искажениям формы импульсного отклика** при синтезе апертуры и формировании радиолокационного изображения:

- расширению отклика, что вызывает ухудшение разрешающей способности РЛИ;
- уменьшению амплитуды сигнала в максимуме отклика, что приводит к погрешности измерения ЭПР целей по РЛИ и ошибкам радиометрической калировки РСА по эталонным точечным целям;
- возрастанию уровня пьедестала отклика в главном лепестке, что вызывает ухудшение условий распознавания компактных целей;
- повышению уровня боковых лепестков, что может привести к появлению ложных отметок на РЛИ;
- повышению интегрального уровня боковых лепестков, что вызывает снижение контраста изображения объектов на РЛИ и радиометрические искажения.

Характер и величина искажений формы отклика зависят от законов распределения фазовых ошибок по синтезированной апертуре, требуемого разрешения РЛИ, а также от формы амплитудного взвешивания, используемого для уменьшения уровня боковых лепестков отклика. Необходимо учитывать также использование некогерентного накопления (усреднение независимых наблюдений) при формировании РЛИ.

В разделе 6.3 были принципиально рассмотрены эффекты, связанные с ошибками фокусирования. Для получения более точных количественных оценок рассмотрим их влияние на форму импульсного отклика при **различных видах амплитудных взвешивающих функций**:

- гауссового взвешивания;
- прямоугольного взвешивающего окна;
- окна Кайзера;
- взвешивающей функции, определяемой формой диаграммы направленности антенны в режиме непрерывной съемки.

### 6.10.2. Аналитическая оценка влияния ошибок фокусирования

Рассмотрим влияние ошибок фокусирования при синтезе апертуры с гауссовым взвешиванием для прямолинейного движения с линейной эквивалентной скоростью (ЛЭС)  $V_{le}$ , аппроксимированного параболическим законом изменения фазы. Нормированный импульсный отклик РСА по азимуту определяется суммированием комплексных отсчетов сигнала от точечной цели по апертуре  $L_a$  с весом, заданным комплексной опорной функцией

$$H_x(k) = \frac{1}{H_{x0}} \sum_{k_1=-N_a/2}^{N_a/2-1} U_s(k-k_1) \exp\{-j\varphi_s(k-k_1)\} W\left(\frac{k_1}{N_m}\right) \exp\{j\varphi_{\text{ref}}(k_1)\}, \quad (6.49)$$

где  $N_m$  – число импульсов в апертуре;  $U_s(k)$  и  $\varphi_s(k)$  – амплитуда и фаза отсчетов сигнала;  $W(k)$  – амплитудная весовая функция обработки;  $\varphi_{\text{ref}}(k)$  – фазовая опорная функция;  $H_{x0}$  – нормирующий множитель, обеспечивающий  $\max\{H_x(k)\} = 1$ .

Фаза отсчетов сигнала определяется формулой

$$\varphi_s(k) = -\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_0^2 + (V_{\text{le}} T_p k)^2} \approx -\frac{2\pi(V_{\text{le}} T_p)^2}{R_0 \lambda} k^2 + \varphi_0, \quad (6.50)$$

где  $\varphi_0 = -4\pi R_0/\lambda$  – фаза отраженного сигнала в начальном положении радиолокатора при нулевой доплеровской частоте.

Фаза отсчетов опорной функции при точной фокусировке должна быть комплексно сопряжена с сигналом (без постоянного члена  $\varphi_0$ ). При ее настройке на расчетное значение ЛЭС она принимает вид

$$\varphi_{\text{ref}}(k) = \frac{4\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{R_0^2 + (V_{\text{ref}} T_p k)^2} - R_0 \right\} \approx \frac{2\pi(V_{\text{le}0} T_p)^2}{R_0 \lambda} k^2. \quad (6.51)$$

Как показано в [152\*], для параболического закона изменения фазы можно получить аналитическое выражение для импульсного отклика, если применить весовую функцию в виде гауссовой кривой, выполняя интегрирование в бесконечных пределах. Интеграл от экспоненты с квадратичным комплексным переменным в бесконечных пределах вычисляется по формуле [60]

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-At^2 + jBt^2 + Ct + jDt\} dt = \\ & = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A^2 + B^2}} \exp\left\{ \frac{AC^2 - AD^2 - 2BCD}{4(A^2 + B^2)} + j \frac{2ACD + BC^2 - BD^2}{4(A^2 + B^2)} + j \arctg \frac{B}{A} \right\}. \end{aligned} \quad (6.52)$$

Преобразуем выражение (6.49) для импульсного отклика в интеграл по координате времени синтеза  $t$

$$\begin{aligned} H_S(t) &= \frac{e^{j\varphi_0}}{H_{x0}} \int_{-\infty}^{\infty} G_S\left(\frac{V_{\text{le}}}{R_0}(t-t_1)\right) G_H\left(\frac{V_{\text{le}0}}{R_0}t_1\right) \exp\left\{-j\frac{2\pi V_{\text{le}}^2}{R_0 \lambda}(t-t_1)^2 + j\frac{2\pi V_{\text{le}0}^2}{R_0 \lambda}t_1^2\right\} dt_1 = \\ &= \frac{\exp\{j\varphi_0\}}{H_{x0}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{2\pi V_{\text{le}0}^2 t_1^2}{b L_a^2} + j\frac{4\pi V_{\text{le}}^2 t t_1}{R_0 \lambda} + j\frac{4\pi \Delta V (V_{\text{le}} + \Delta V/2)}{R_0 \lambda} t_1^2\right\} dt_1, \end{aligned} \quad (6.53)$$

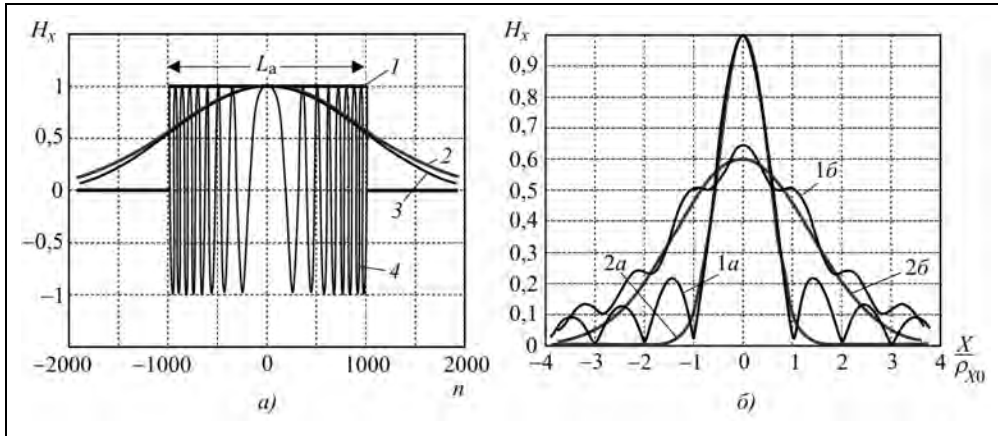
где  $G_S(\alpha) \approx G_H(\alpha) \approx \exp\left\{-\frac{\pi V_{\text{le}0}^2 t^2}{b L_a^2}\right\}$  – форма ДНА по мощности (определяющая амплитуду принятого сигнала) и огибающая опорной функции по амплитуде

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

(на практике для расчета амплитуд можно приближенно считать  $\sin \alpha \approx \alpha$  и  $V_{le} \approx V_{le0}$ ).

Здесь  $\frac{\pi}{b} = \frac{\pi}{2 \ln 2} = \frac{\pi}{1,3863}$  – нормирующий множитель, при котором главные лепестки импульсной реакции для прямоугольного окна и гауссова взвешивания практически совпадают.

Типичные формы огибающей сигнала (радиоголограммы) показаны на рис. 6.27,а. По оси ординат отложены относительные значения. Прямоугольная форма с длиной апертуры  $L_a$  соответствует режимам Скансар, прожекторному или маршрутному с накоплением наблюдений в парциальных апертурах (Multilook). В этих режимах сигнал ограничен по времени. Гауссова огибающая формула (6.53) аппроксимирует сигналы маршрутного режима с ограничением по горизонтальному размеру антенны, когда огибающая определяется формой ДНА по мощности и близка к  $\text{sinc}^2$  (с расширением на  $\sim 20\%$  для снижения уровня боковых лепестков).



**Рис. 6.27.** Формы огибающей сигнала и импульсного отклика РСА по азимуту:

*a* – форма радиоголограммы от точечной цели: 1 – прямоугольная огибающая, 2 – гауссовая огибающая, 3 – форма ДНА  $\text{sinc}^2$  с расширением на 20 %, 4 – действительная составляющая сигнала; *б* – форма фокусированного импульсного отклика (1а и 2а) и отклика с ошибками фокусирования  $m_{дф}=3,84$  (1б и 2б)

Перейдя от времени  $t$  к безразмерной переменной  $n=t/T_p$  – номеру отсчета, можно представить параметры, входящие в формулу (6.52), в следующей форме

$$A = \frac{2\pi}{bN_{\text{synt}}^2}; \quad B \approx \frac{2\pi K_{\text{synt}} \Delta V}{N_{\text{synt}}^2 V_{le}}; \quad C = 0; \quad D = \frac{2\pi}{N_{\text{synt}}} \frac{X}{\rho_{X0}}, \quad (6.54)$$

где  $K_{\text{synt}} = \frac{2L_a^2}{R_0 \lambda} = \frac{L_a}{\rho_{X0}}$  – расчетное значение коэффициента сжатия по азимуту;

$N_{\text{synt}} = \frac{L_a}{V_{le0} T_p}$  – число отсчетов в расчетной апертуре  $L_a$ .



Вычислив интеграл (6.52), получим формулы для импульсного отклика

$$H_{x0} = N_{\text{synt}} \sqrt{2b_e} = 0,83N_{\text{synt}}; \quad (6.55)$$

$$H_x(X) = \frac{1}{\sqrt[4]{1+(b_e m_{\text{df}})^2}} \exp \left\{ -2\pi b_e \frac{X^2}{\rho_X^2} - j \frac{2b_e^2 \pi m_{\text{df}}}{(1+(b_e m_{\text{df}})^2)} \frac{X^2}{\rho_X^2} + j \arctg(b_e m_{\text{df}}) \right\},$$

где  $b_e = b/4 = \ln 2/2 = 0,346$ ;  $\rho_X = \rho_{X0} \sqrt{1+(b_e m_{\text{df}})^2}$  – ширина расфокусированного импульсного отклика.

На рис. 6.27,б приведена форма импульсного отклика при точной фокусировке и наличии ошибок измерения ЛЭС, характеризуемых «коэффициентом дефокусировки»  $m_{\text{df}} = \frac{2R_0 \lambda \Delta V}{\rho_{X0}^2 V_{\text{le0}}}$  (см. раздел 6.3). Масштаб по оси абсцисс нормирован –

отложено отношение азимута РСА к разрешению при точной фокусировке. Теоретическое значение ширины фокусированного отклика по уровню минус 3 дБ для прямоугольного окна составляет  $\rho_{X0} = 0,88R_0 \lambda / 2L_a$ .

На рис. 6.28 приведены зависимости приращения (от максимума отклика) фазы импульсного отклика в зависимости от нормированного азимута РСА (отношения азимутального смещения к ширине фокусированного отклика) при точной фокусировке  $m_{\text{df}}=0$  и ошибках фокусирования  $m_{\text{df}}=2; 4; 8$ . Для сравнения пунктиром показана форма отклика в относительных единицах.

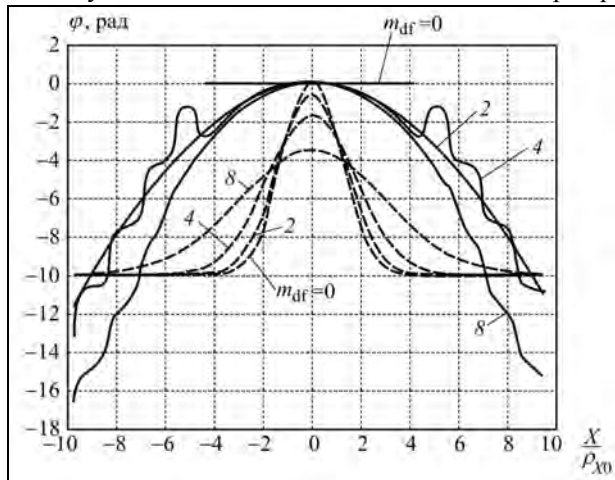


Рис. 6.28. Зависимость фазы импульсного отклика (—) и его формы (---) от азимута при ошибках фокусирования  $m_{\text{df}}$

Сравнение проведенных расчетов с расчетами (см. раздел 6.3) для оптической модели синтеза РЛИ, показывает, что при гауссовом взвешивании допустимые ошибки измерения ЛЭС примерно в 1,5 раза больше. При 10 % ухудшении разрешения ( $m_{\text{df}} = 1,5$ ) энергетические потери не превышают 0,3 дБ. Четко видно, что при точной фокусировке фаза импульсного отклика постоянна и не зависит от азимута цели. При дефокусировке наблюдаются близкие к параболлической зависимости фазы от азимута, которые в существенной части импульсного отклика могут достигать 15...20°. Именно это явление лежит в основе эффективного алгоритма автофокусировки – фазово-градиентного метода PGA.

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Используя приведенные соотношения, найдем автокорреляционную функцию амплитудного РЛИ при наблюдении точечной цели и слабокоррелированного фона местности. Функциональная схема модели приведена на рис. 6.29.



Рис. 6.29. Функциональная схема модели формирования амплитудного РЛИ с вычислением автокорреляционной функции изображения

На рис. 6.30 и 6.31 приведены радиоголограммы (действительная часть) и амплитудные РЛИ от точечной цели и слабо коррелированного сигнала от фона местности. По осям координат отложены условные единицы. Рассмотрены две ситуации – фокусированный синтез и расстройка фильтра обработки по значению ЛЭС с  $m_{df}=8$ .

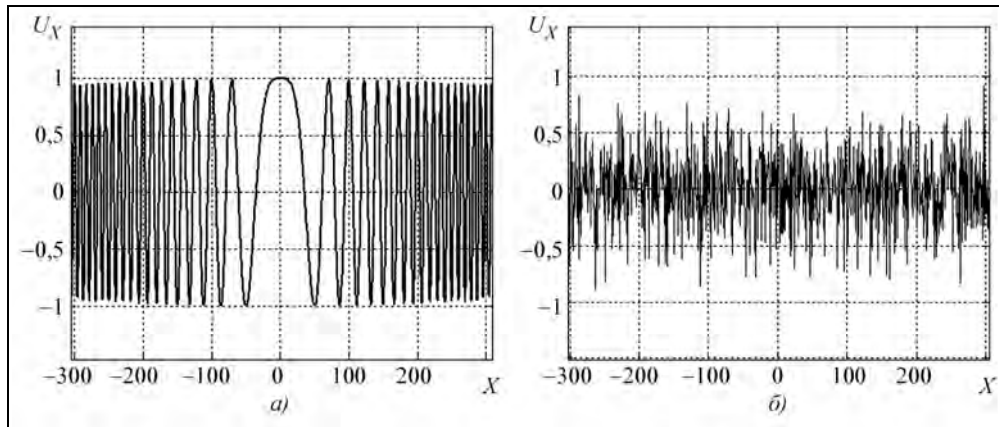


Рис. 6.30. Радиоголограммы от точечной цели (а) и фона местности (б)

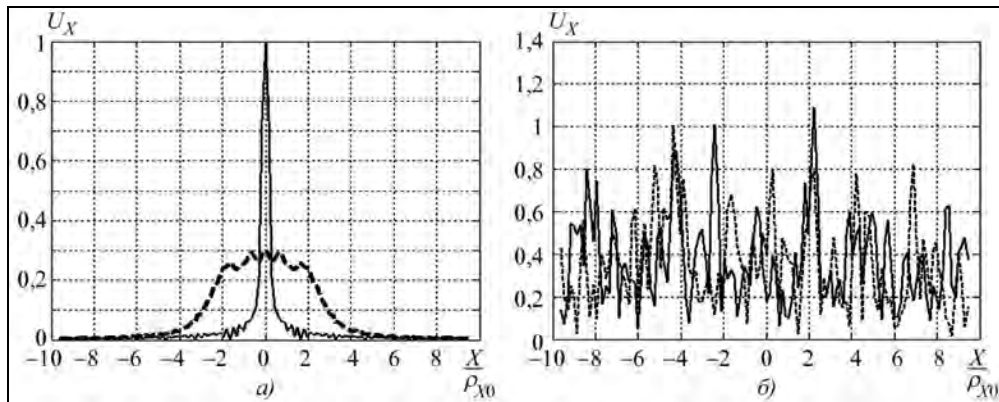


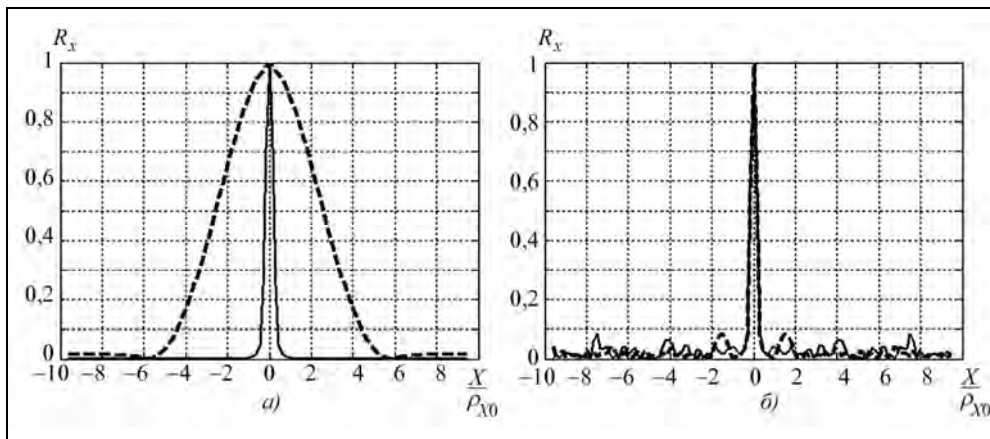
Рис. 6.31. Выходные амплитудные РЛИ точечной цели (а) и фона местности (б) для фокусированного синтеза (—) и ошибки ЛЭС (---)

Показанный на рис. 6.31,*a* отклик от точечной цели при расфокусировке расширяется, в то время как структура случайного процесса от фона (см. рис. 6.31,*б*) остается схожей – в виде коротких выбросов, но расположенных в других местах. Поэтому в реальных условиях для слабокоррелированного фона при расфокусировке теряется информация о текстуре поверхности, но статистические характеристики выходного процесса сохраняются. Дело в том, что статистические характеристики некоррелированного процесса зависят только от энергетического спектра и не меняются при изменении фазовых характеристик фильтра обработки.

Автокорреляционную функцию флуктуаций сигнала на выходе квадратичного детектора для равномерного однородного  $\delta$ -коррелированного фона местности можно рассчитать через импульсный отклик системы  $H_x(X)$ , который определяет процесс на входе нелинейного звена – квадратичного детектора. Коэффициент корреляции сигнала на выходе квадратичного детектора равен квадрату коэффициента корреляции процесса на его входе [136]:

$$R_S(X) = B_S^2(X) = \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} H_S(S) H_S(S+X) dS \right\}^2. \quad (6.56)$$

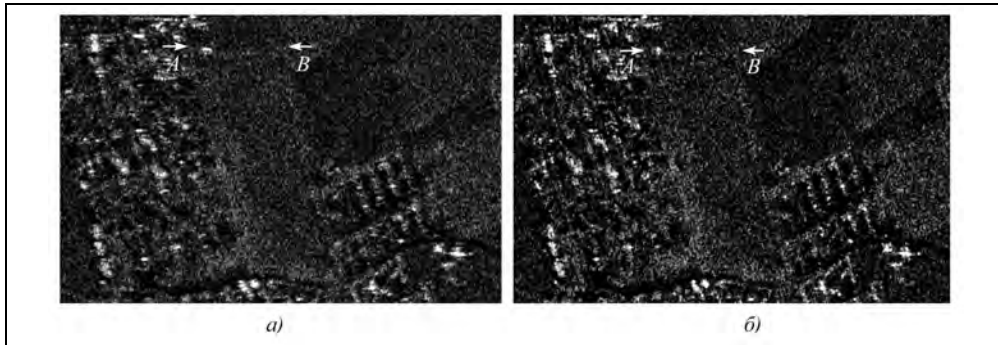
Автокорреляционная функция, как и импульсный отклик для рассматриваемого случая гауссова амплитудного взвешивания, имеет вид колоколообразной кривой. Форма автокорреляционной функции РЛИ точечной цели и РЛИ слабокоррелированного фона (с вычетом постоянной составляющей) показаны на рис. 6.32 при фокусированном синтезе и рассогласовании по ЛЭС с  $m_{df} = 8$ . Для фона они практически совпадают, что не позволяет реализовать автофокусировку по радиолокационным изображениям протяженной поверхности с равномерной удельной ЭПР (поля, луга, лесные массивы).



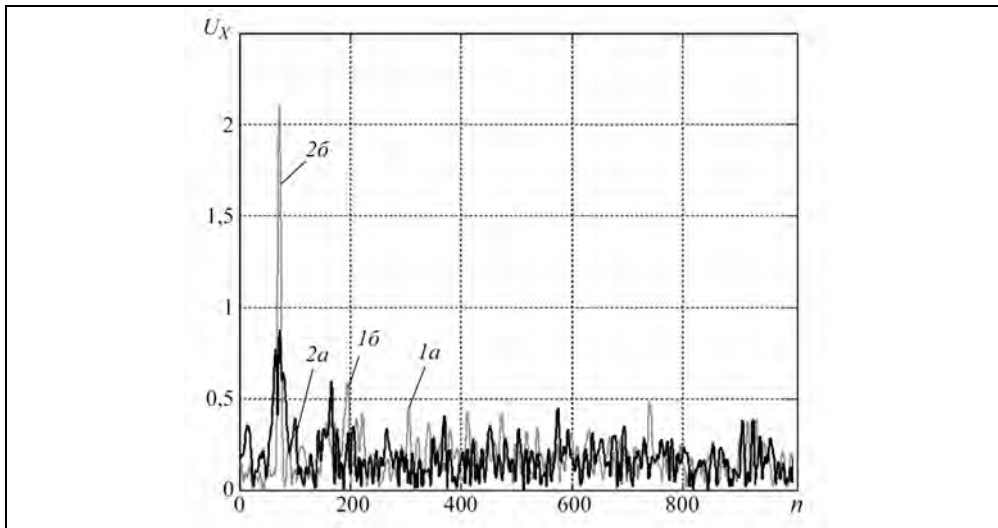
**Рис. 6.32.** Нормированные автокорреляционные функции амплитудных РЛИ точечной цели (*a*) и фона местности (*б*) для фокусированного синтеза (—) и ошибки ЛЭС (---)

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

На рис. 6.33 приведен фрагмент изображения сельской местности с жилой застройкой и полем – частично дефокусированное РЛИ (рис. 6.33,*а*) и РЛИ с точной фокусировкой (рис. 6.33,*б*). На рис. 6.34 даны азимутальные сечения этих РЛИ по линиям *AB*, проходящие через компактный яркий объект и участок поля.



**Рис. 6.33.** Фрагмент РЛИ сельской местности с жилой застройкой:  
*а* – дефокусированное РЛИ; *б* – РЛИ с точной фокусировкой



**Рис. 6.34.** Азимутальное сечение по линии *A–B* радиолокационного изображения поля (*1*) с ярким компактным объектом (*2*):  
*1а*, *2а* – частично дефокусированное РЛИ; *1б*, *2б* – точная фокусировка  
(по оси абсцисс отложены отсчеты РЛИ)

Изменения структуры принятого от поля сигнала практически незаметны, а отклик от компактного объекта уменьшается в 2,6 раза и расширяется в несколько раз. Заметим, что на дефокусированном РЛИ большинство объектов, обнаруживаемых на сфокусированном РЛИ, также обнаруживается. Это объясняется тем, что при расфокусировке энергия от цели сохраняется, и суммарное отношение сигнал/шум+фон остается прежним.

**6.10.3. Влияние ошибок фокусирования на форму отклика при амплитудном взвешивании**

Рассмотренный в предыдущем разделе алгоритм синтеза РЛИ с гауссовым взвешиванием имеет ряд недостатков. Во-первых, форма отклика далека от  $\delta$ -функции (и короткого импульса) и имеет пологие склоны. При ограниченной длительности сигнала ее применение ухудшает разрешающую способность. При синтезе без взвешивания, в прямоугольном окне форма отклика имеет большие боковые лепестки, для снижения которых применяют аподизацию с нахождением компромисса между ухудшением разрешения, энергетического потенциала, требованиями по производительности вычислительных средств. Во-вторых, его преимущества заключаются в сохранении колоколообразной формы импульсного отклика с малым уровнем боковых лепестков при дефокусировке. В ряде случаев это свойство может оказаться важным, например, при обнаружении слабых целей на ровной поверхности в гористых районах (ущельях).

На практике применяют синтез РЛИ без аподизации (в прямоугольном окне), с взвешиванием по Кайзеру, Хеммингу и даже с «апертурной коррекцией» (подъемом верхних частот спектра) для улучшения пространственного разрешения радиолокационных портретов целей [2, 229, 475]. При полном использовании сигнала, принятого в маршрутном режиме для формирования РЛИ с предельным разрешением по азимуту, необходимо учитывать амплитудное взвешивание, вызванное формой ДНА. Форма отклика определяется суммарным эффектом ДНА и взвешивающей функцией при синтезе РЛИ.

Форму двумерного импульсного отклика иллюстрирует рис. 6.35. Представлены три случая амплитудного взвешивания: прямоугольное окно в спектральной области по азимуту и дальности (рис. 6.35, а), усеченные «естественное» взвешивание по азимуту, обусловленное формой ДНА  $\text{sinc}^2$ , и косинусоидальное  $\cos x$  – по дальности (рис. 6.35, б), а также усеченное двумерное гауссово взвешивание спектра сигнала по обеим координатам (рис. 6.35, в). Усечение, вызванное ограниченностью длительности облучающего цель сигнала, приводит к многолепестковости импульсного отклика, даже при гауссовом взвешивании (хотя и с очень низким уровнем боковых лепестков). В табл. 6.1 приведены относительные значения максимального уровня боковых лепестков (начиная с первого или со второго), а также интегрального уровня боковых лепестков (ISLR – Integral side lobe ratio) для показанных на рисунке двумерных откликов. Главный лепесток отсчитывался по первым нулям (минимумам) отклика. При гауссовом взвешивании практически вся энергия сосредоточена в главном лепестке.

**Таблица 6.1. Относительные значения максимального уровня боковых лепестков**

Вид взвешивающей функции	Прямоугольное окно	Азимут – $\text{sinc}^2$ дальность – $\cos x$	Гауссово взвешивание
Уровень боковых лепестков, дБ первых вторых	–13,46 –17,9	–19,3 –23,2	–29,3 –29,4
Интегральный уровень боковых лепестков ISLR, дБ включая первые исключая первые	6,6 9,8	–14,8 –16,5	–19,5 –20

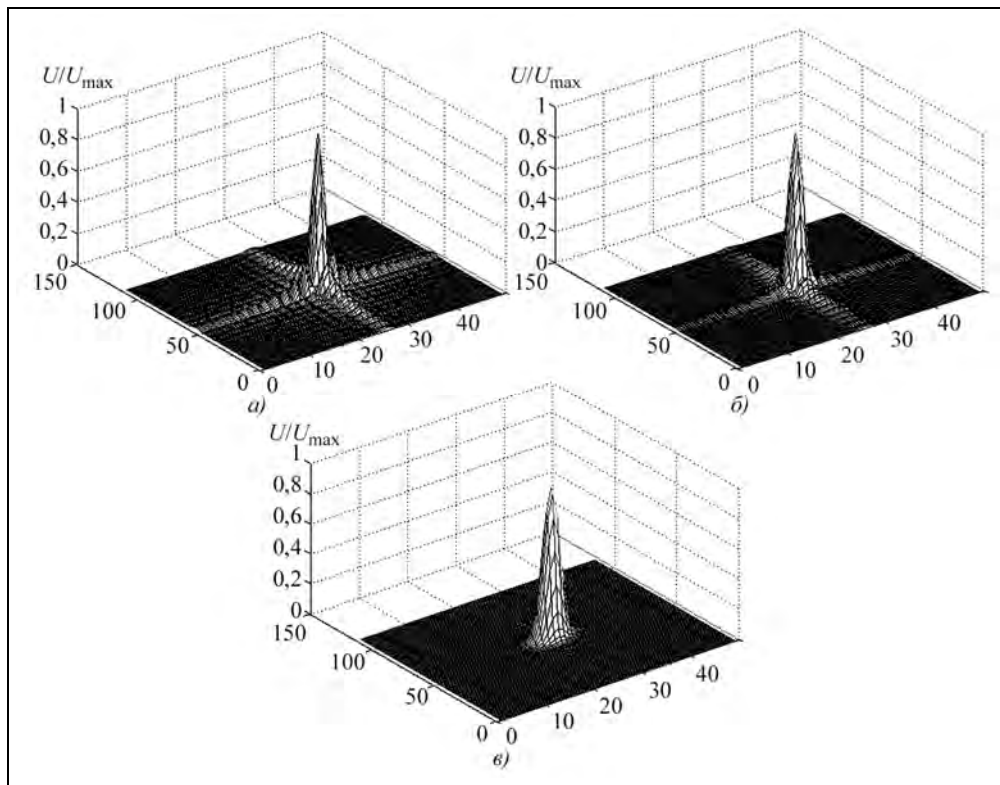
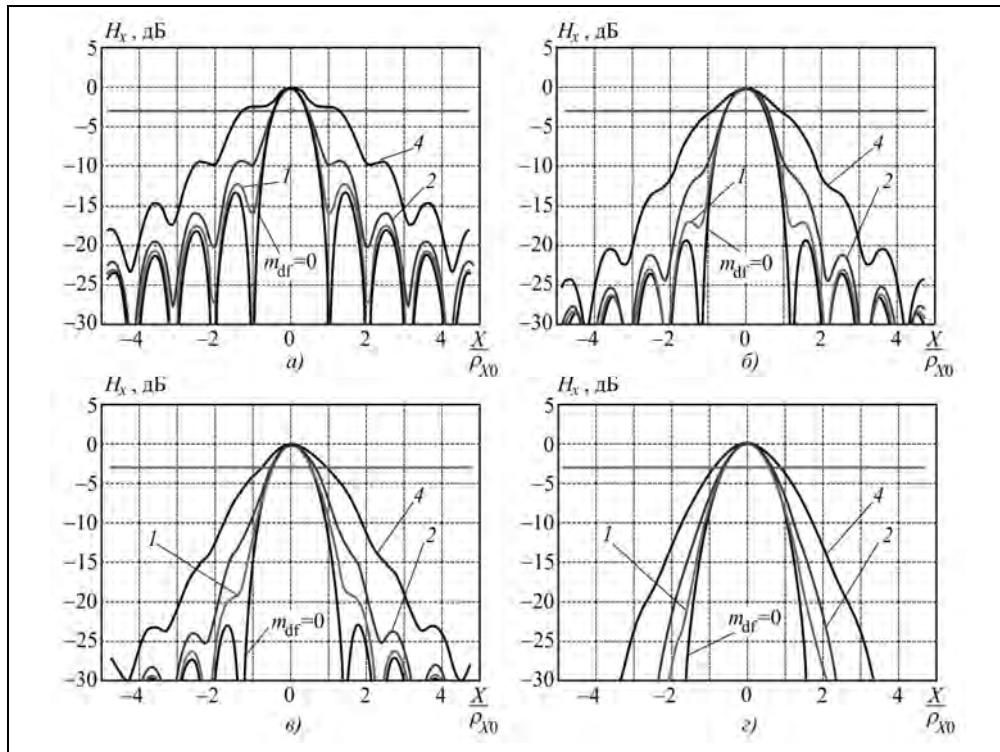


Рис. 6.35. Вид импульсных откликов РСА при синтезе с прямоугольным окном (а), с взвешиванием диаграммой антенны вида  $\text{sinc}^2$  (б) и двумерным гауссовым взвешиванием (в)

Ниже рассмотрено влияние расфокусировки на форму импульсного отклика для типичных видов взвешивающих функций. Отметим, что применительно к задачам автофокусировки при наличии на РЛИ точечных целей, информация (например, фазовая), заключающаяся в боковых лепестках, может оказаться полезной для ее использования до снижения уровня боковых лепестков.

На рис. 6.36,а приведена форма импульсного отклика (сечение по азимуту) при постоянной амплитуде принятого по апертуре сигнала (прожекторный режим или приближенно – режим Скансар) для прямоугольного окна опорной функции. Значение коэффициента дефокусировки –  $m_{df} = 0; 1; 2; 4$ . Точная фокусировка имеет теоретический отклик вида  $\text{sinc}$  с шириной  $\rho_{X0} = \frac{0,88R_0\lambda}{2L_a}$  по уровню минус 3 дБ и уровнем первых боковых лепестков минус 13,46 дБ. При обработке сигнала в маршрутного режиме с аподизацией сигнала формой ДНА и прямоугольной форме опорной функции разрешение составляет  $\rho_{X0} = \frac{D_{xant}}{2}$ , а лепестки снижают-

ся до  $-19,3$  дБ (рис. 6.36,б). Аналогичная картина получается при обработке сигнала прожекторного режима (и режима Скансар) и использовании при синтезе окна Кайзера (рис. 6.36,в).



**Рис. 6.36.** Азимутальное сечение импульсного отклика РСА при синтезе с разными функциями взвешивания и расфокусировке: прямоугольным окном (а), учетом формы ДНА (б), окном Кайзера  $\beta = 2,9$  без влияния ДНА (в) и с учетом влияния ДНА вида  $\text{sinc}^2$  (г)

При синтезе маршрутного режима с опорной функции, имеющей взвешивание окном Кайзера, как на рис. 6.36,б,г, импульсный отклик расширяется до  $\rho_{X0} = \frac{1,3R_0\lambda}{2L_a}$ , а уровень лепестков падает до минус 35 дБ. Во всех случаях при дефокусировке до  $m_{df} \leq 2$  отклик расширяется не более, чем на 10 %, энергетические потери не превышают 0,5 дБ, но возрастает уровень первых боковых лепестков до минус 10...15 дБ.

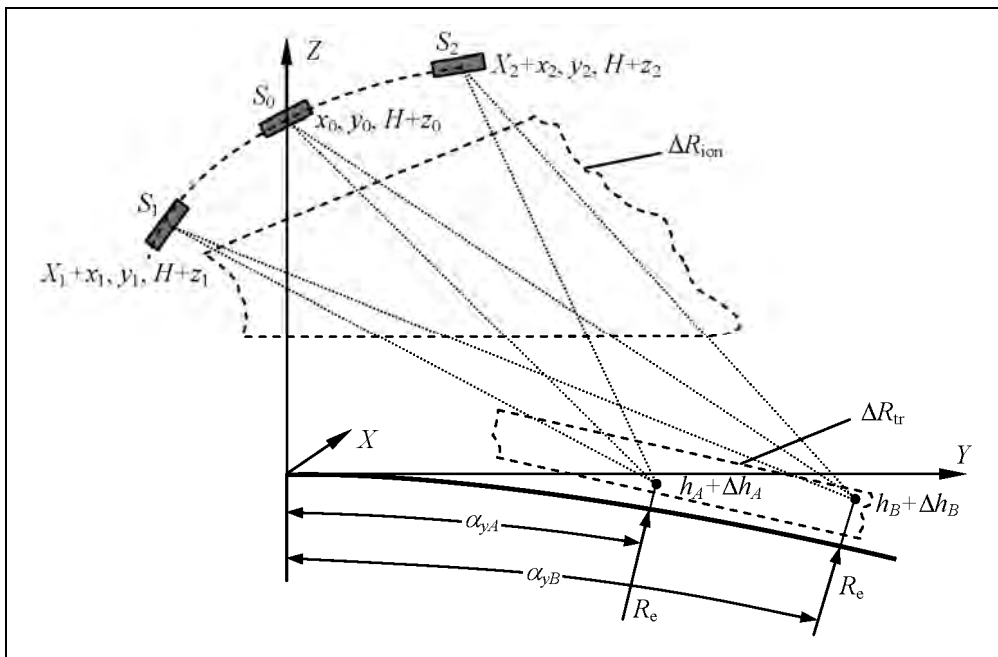
#### 6.10.4. Влияние погрешностей измерения координат КА, трассы распространения сигнала и рельефа местности на точность фокусировки РЛИ

В РСА авиационного базирования (самолеты, вертолеты, БЛА) основным деструктивным фактором являются траекторные нестабильности. В космических РСА, не-

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

смотря на увеличение длины синтезированной апертуры в десятки раз, движение КА можно считать стабильным с погрешностями, обусловленными точностью баллистических измерений. Высокая точность баллистической информации обеспечивается путем внешних траекторных измерений с прогнозом параметров движения на момент съемки и их уточнения после съемки. Используется также бортовая аппаратура позиционирования ГЛОНАСС или GPS, как это предусмотрено в РСА TerraSAR-X [315], где первоначальная точность позиционирования составляет 10 м (СКО), а с применением дополнительных средств – 2 или 0,1 м.

К фазовым искажениям, вызванным ошибками баллистических расчетов и измерений, основной составляющей которых является погрешность вычисления ЛЭС, следует добавить регулярную часть запаздывания радиоволн (изменение параметра «наклонная дальность») в трассе распространения сигнала – атмосфере (тропосфере и ионосфере). На рис. 6.37 показана геометрия обзора, учитывающая погрешности оценки координат КА и целей, а также прохождения сигнала через тропосферу и ионосферу.



**Рис. 6.37.** Геометрия обзора, учитывающая погрешности оценки координат КА и целей, а также прохождения сигналов через тропосферу и ионосферу

Для определенности зададим параметры обзора и наблюдаемой сцены, приведенные в табл. 6.2, и будем рассматривать РСА с рабочими длинами волн от 3 до 68 см. Сводные характеристики проявления дестабилизирующих факторов приведены в табл. 6.3, где  $\sigma_{xyz}$ ,  $\sigma_V$ ,  $\sigma_A$ ,  $\sigma_{Vle}$  – СКО координаты КА, скорости, ускорения, ЛЭС.



**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

**Таблица 6.2. Параметры движения КА и наблюдаемой сцены**

Параметр, размерность	Обозначение	Значение	
Высота орбиты, км	$H$	500	
Путевая скорость, м/с	$V$	7500	
Время отсчета координат КА, с	$\pm \Delta t$	$\pm 30$	
Начальная наклонная дальность, км	$R_{0A}$	700	
Конечная наклонная дальность, км	$R_{0B}$	720	
Значение ЛЭС, м/с:			
	начало зоны	$V_{leA}$	7211,7
	конец зоны	$V_{leB}$	7210,6
Ошибки карт рельефа, м	$\Delta R_{hA}$	$\pm 20$	
	$\Delta R_{hB}$		
Задержка по дальности, м:			
	в тропосфере [128, 390]	$\Delta R_{tr}$	$\sim 3,76$
	в ионосфере [59, 128] ( $r_{ion} = 4,48 \cdot \text{ТЕС}/\text{TECU}$ )	$\Delta R_{ion}$	$\sim r_{ion} \lambda^2$

**Таблица 6.3. Сводные характеристики проявления дестабилизирующих факторов**

№ п/п	Параметр	$\sigma_V$ , м/с	$\sigma_A$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_{le}$ , м/с	Разрешающая способность РСА, м, при длине волны, см				
					3	5,6	9,4	23	68
1	Разрешение по наклонной дальности, ограниченное регламентом радиосвязи $\rho_R$ , м								
		0,25	0,5	0,75	1,76	25 (5)			
	Величина составляющих ошибок				Реализуемое разрешение, м				
2	$\sigma_{xyz} = 0,5$ м	0,012	$3 \cdot 10^{-4}$	0,033	0,75	1,023	1,32	2,07	3,58
3	$\sigma_{xyz} = 1$ м	0,047	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,135	1,50	2,05	2,66	4,14	7,20
4	$\sigma_{xyz} = 2$ м	0,189	$5,4 \cdot 10^{-4}$	0,535	3,0	4,08	5,31	8,25	14,29
5	$\sigma_{xyz} = 4$ м	0,759	$2,2 \cdot 10^{-3}$	2,136	6,0	8,23	10,65	16,54	28,49
6	$\sigma_{xyz} = 8$ м	3,035	$8,8 \cdot 10^{-4}$	8,48	12,0	16,36	21,2	33,47	56,84
7	Высота рельефа местности $h=1000$ м				1,74	2,38	3,08	4,82	8,3
8	Время синтеза апертуры $T_{syn}$ , с				2,9	1,8	6,0	6,3	1,3 (6,5)
9	Размеры апертуры синтеза, км				22	14	45	47	10 (50)
10	Длина участка в угловом секторе синтеза, км:								
	ионосфера $H_{ion}=300$ км				13	8,4	27	28	6 (30)
	тропосфера $H_{tr}=6$ км				0,25	0,15	0,55	0,57	0,25 (0,75)
11	Смещение дальности в ионосфере $\Delta R_{ion}$ , м				0,02	0,07	0,2	1,18	10,36

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Рефракция радиоволн в тропосфере вызывает искривление пути и увеличение времени распространения радиоволн [128, 390]. Величину поправки наклонной дальности  $\Delta R_{tr}$ , вызванной увеличением времени вследствие искривления трассы распространения радиоволн и уменьшения скорости радиоволн в тропосфере, можно оценить по приближенной формуле [128]

$$\Delta R_{tr} = 10^6 \frac{N_0}{\cos \gamma_i} \int_0^H \exp\{-0,13h_{km}\} dh, \quad (6.57)$$

где  $N_0 = (n-1)10^6$  – так называемый, индекс преломления тропосферы;  $\gamma_i$  – угол падения радиоволн на земную поверхность;  $H \approx 20$  км – высота атмосферного слоя;  $h$  – размер ступени интегрирования слоев тропосферы (в метрах);  $h_{km}$  – текущая высота слоя (в километрах);  $n$  – коэффициент преломления тропосферы на уровне моря ( $n=1,00035$ ).

Предполагается, что градиент изменения коэффициента преломления тропосферы постоянен по высоте и равен  $\frac{\partial n}{\partial H} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$  (нормальная тропосфера). При

угле падения радиоволн  $\gamma_i = 45^\circ$  поправка на распространение сигнала в тропосфере составляет  $\Delta R_{tr} = 3,76$  м и не зависит от частоты зондирующего сигнала. Регулярная составляющая задержки не ухудшает разрешения РЛИ. Однако интервал пространственной корреляции фазы (масштаб турбулентности) обычно составляет 50...100 м, что меньше пределов углового сектора апертуры синтеза (табл. 6.2), и может потребоваться компенсация случайных фазовых флуктуаций по апертуре синтеза путем автофокусировки.

Влияние ионосферы, содержащей электронную плазму, имеет аналогичный характер, как для тропосферы, но оно значительно более выражено, поскольку диапазон высот ионосферы шире (от 60 до 1000 км при максимуме ионизации в районе 200...300 км), угловой сектор синтеза РЛИ перекрывает большой пространственный интервал с неоднородностями и, кроме того, деструктивные воздействия возрастают с ростом рабочей длины волны РСА. Для ионосферы коэффициент преломления и фаза принятого сигнала, определяемая задержкой, зависят от полного электронного содержания (ПЭС) ТЕС (Total Electron Content [390]) вдоль направления распространения луча

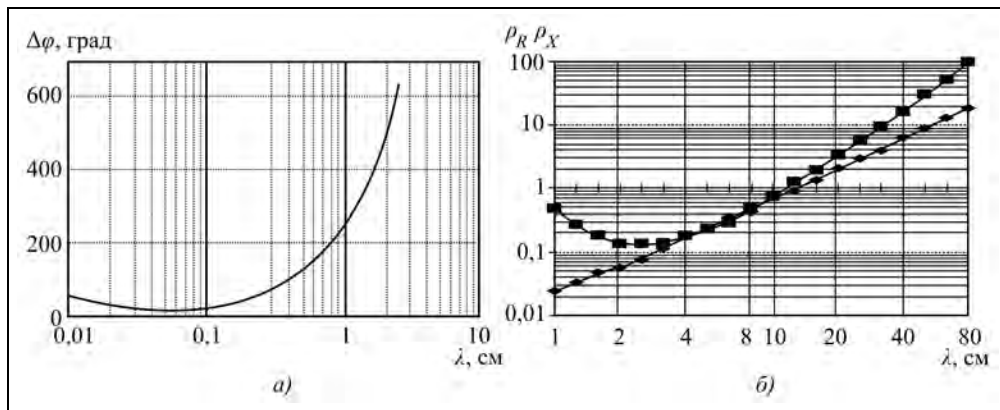
$$n_{ion} = \sqrt{\epsilon_{ion}} = \sqrt{1 - 80,8 \frac{I}{f^2}}, \quad (6.58)$$

$$\Delta \varphi_{ion} = \frac{2\pi f}{c} \int_s \frac{40,308}{f^2} N_e ds = \frac{8,44 \cdot 10^{-7} I}{f}, \quad (6.59)$$

где  $f$  – несущая частота сигнала;  $I = \int_s N_e ds = \text{ТЕС} \approx 5 \text{ТЕСУ}$  – величина ПЭС вдоль

направления распространения;  $\text{ТЕСУ} = 10^{16} \text{ эл./м}^2$  – единица ПЭС (Total Electron Content Unit);  $N_e \approx 10^{12}$  – плотность электронов.

Как показал анализ экспериментов [390], СКО фазы (задержки сигнала), вызванной влиянием атмосферы, составляет примерно 10...20 % от величины запаздывания сигнала в целом по кадру, которое может быть учтено в алгоритме синтеза по метеорологическим данным и/или информации о состоянии ионосферы в районе съемки. Для дециметровых диапазонов волн, где больше влияет ионосфера, может предусматриваться применение специальных измерений (с разделением частот) для оценки полного объема электронов и коррекции параметров обработки сигналов [488]. Остаточные фазовые искажения и случайные фазовые ошибки, вызванные нестабильностями пространственно-временного распределения по апертуре синтеза, подлежат компенсации путем автофокусировки. Их значения (СКО), а также зависимости от длины волны реализуемого разрешения по азимуту и дальности без применения автофокусировки приведены на рис. 6.38. Масштаб неоднородностей ионосферы 200...5000 м также меньше углового сектора синтеза РЛИ, что требует применения автофокусировки РЛИ для компенсации фазовых ошибок.



**Рис. 6.38.** Зависимости фазы сигнала и разрешения от длины волны РСА:  
 а – СКО флуктуаций фазы [390]; б – реализуемого разрешения по азимуту и дальности без применения автофокусировки (см. [128], подраздел 2.2.3)

Среднее значение смещения дальности  $\Delta R_{\text{ion}}$ , вызванное прохождением сигнала через ионосферу при  $\text{TEC}=5 \text{ TECU}$  в диапазонах волн от 3 до 70 см, составляет  $\Delta R_{\text{ion}} = 0,02 \dots 10 \text{ м}$ . Такая величина запаздывания практически не ухудшает азимутального разрешения ( $\rho_x \approx 0,032 \dots 0,35 \text{ м}$ ). Основная причина ухудшения разрешающей способности – флуктуации фазы вдоль разных путей распространения сигнала, вызванные пространственными и временными (за время синтеза) неоднородностями.

Оценим теперь влияние ошибок измерения координат КА. Следует иметь в виду, что ошибки вычисления наклонной дальности до объекта съемки (центра кадра или начала полосы съемки) сами по себе не вызывают расфокусировки РЛИ. Наклонная дальность каждого пикселя РЛИ относительно центра масс КА определяется частотой квантования сигнала, которая формируется от высокостабильного бортового эталона времени. При ошибках измерения текущего положения КА объ-

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

ект съемки смещается относительно расчетного пикселя РЛИ (ошибки привязки РЛИ к географическим координатам). Появление ошибок позиционирования отражается на вычислении значения ЛЭС или аналогичных параметров опорной функции для синтеза РЛИ.

В качестве примера рассмотрим геометрию обзора на рис. 6.37 с параметрами движения КА и наблюдаемой сцены, приведенными в табл. 6.2. Расчеты ведем относительно положения КА в точке  $S_0$  при  $t_0=0$  с измеренными координатами КА  $(x_0, y_0, H+z_0)$ , где малыми буквами обозначены ошибки измерений.

Расчетные координаты точек визирования  $A$  и  $B$  в пикселях РЛИ с наклонными дальностями  $R_{0A}$ ,  $R_{0B}$  и нулевой координатой по азимуту  $X_A = X_B = 0$  (ноль доплеровской частоты) определяются следующими формулами, в том числе с заменой в (6.60)–(6.63) индексов  $A$  на  $B$

$$X_A = X_B = x_0, \quad (6.60)$$

$$\alpha_{yA} = \arccos \left( \frac{(R_s + z_0)^2 + (R_e + h_A + \Delta h_A)^2 - (R_{0A} - \Delta R_{tr} - \Delta R_{ion})^2}{2(R_s + z_0)(R_e + h_A + \Delta h_A)} \right), \quad (6.61)$$

$$Y_A = (R_e + h_A + \Delta h_A) \sin \alpha_{yA}, \quad (6.62)$$

$$Z_A = (R_e + h_A + \Delta h_A) \cos \alpha_{yA} - R_e. \quad (6.63)$$

Как правило, в служебную информацию, сопровождающую записанную радиолограмму, включают измеренные координаты КА в гринвичской системе координат (ГСК), проекции вектора скорости и ускорения. Эти параметры вычисляют путем совместной обработки данных внешних траекторных измерений и бортовых датчиков. Используют процедуры сглаживания, результат которых можно представить в виде постоянных для всего интервала синтеза ошибок и флуктуационных составляющих. Их влияние на фокусирование РЛИ различно, при этом постоянная ошибка вычисления координат КА аналогична изменению высоты цели слабо влияет на величину ЛЭС. Для ориентировочной оценки изменений ЛЭС воспользуемся формулой (5.100) гл. 5, подставив в нее координаты КА для  $t=0$  и  $t=\pm\Delta t$  с добавлением случайных ошибок по каждой координате

$$\begin{aligned} V_{leA} &= \sqrt{\frac{R_A(-\Delta t)^2 + R_A(\Delta t)^2 - 2R_A(0)^2}{2\Delta t^2}} = \\ &= \frac{1}{\Delta t\sqrt{2}} \left\{ (X_1 + x_1 - x_0)^2 + (Y_1 + y_1 - Y_A)^2 + (Z_1 + z_1 - Z_A)^2 + (X_2 + x_2 - x_0)^2 + \right. \\ &\quad \left. + (Y_2 + y_2 - Y_A)^2 + (Z_2 + z_2 - Z_A)^2 - 2(Y_0 + y_0 - Y_A)^2 - 2(Z_0 + z_0 - Z_A)^2 \right\}^{1/2}, \quad (6.64) \end{aligned}$$

где  $x, y, z, \Delta t$  с индексами – случайные значения ошибок.

Результаты математического моделирования влияния ошибок приведены в табл. 6.3. Интервал времени выбран достаточно большим  $\Delta t=30$  с, при котором сглаженные отсчеты координат, скоростей и ускорений КА можно считать некоррелированными. Для сравнения в таблице приведены значения СКО скоростей  $\sigma_v$  и

ускорений  $\sigma_A$  КА, а также СКО полученных значений ЛЭС  $\sigma_{V_{le}}$ . Среднее значение ЛЭС для начала зоны равно  $V_{leA}=7211,7$  м/с, для конца зоны  $V_{leB}=7210,6$  м/с.

В табл. 6.3 приведены значения разрешающей способности по наклонной дальности в разных диапазонах волн, которые ограничены полосой сигнала, выделенной Регламентом радиосвязи для исследований Земли из космоса (для  $P$ -диапазона в скобках указано разрешение 5 м с учетом возможной перспективы). Предполагается получение одинакового разрешения по азимуту и дальности.

Для приведенных в табл. 6.3 СКО составляющих ошибок даны соответствующие коэффициенту  $m_{df}=1$  значения азимутального разрешения, которые гарантировано (по  $3\sigma_{V_{le}}$ ) могут быть обеспечены без автофокусировки. Заметим, что при эксплуатации РСА  $S$ -диапазона волн «Меч-КУ» обеспечивалось без применения автофокусировки азимутальное разрешение 11...15 м по известным баллистическим данным – значению, так называемой, «приведенной дальности», соответствующей изменению ЛЭС.

Проведенное математическое моделирование формулы (6.64) показало, что при орбитальном движении необходима коррекция опорной функции по дальности с учетом изменения ЛЭС. Необходим также учет рельефа местности. В отличие от прямолинейного равномерного движения платформы изменение высоты цели на 1 км требует поправки к значению ЛЭС на 0,526 м/с для исключения расфокусировки РЛИ (строка 7 табл. 6.3).

В строках 8–10 табл. 6.3 приведены размеры апертуры синтеза РЛИ и длины участков в угловом секторе синтеза РЛИ на высотах 300 км (ионосфера) и 6 км (тропосфера). Для случая прожекторного режима съемки с некогерентным накоплением приведенные размеры участков должны быть увеличены в число раз, определяемых числом наблюдений  $N_c$ .

В строке 11 табл. 6.3 даны расчетные значения регулярного смещения по дальности, вызванное прохождением сигнала через ионосферу при  $TEC=5 \cdot TECU$ .

Анализ приведенных в табл. 6.3 данных показывает, что реализация высокого пространственного разрешения в космических РСА предъявляет очень жесткие требования к знанию параметров орбитального движения, которые не во всех случаях могут быть обеспечены. Вместе с тем, по баллистической информации может быть выполнен синтез комплексных РЛИ с ухудшенной разрешающей способностью, но пригодных для первичного дешифрирования с обнаружением ярких объектов и локализацией участков для детального дешифрирования с применением автофокусировки, радиолокационного портретирования объектов и их классификации.

#### **6.10.5. Обзор алгоритмов автофокусировки**

**Сигнальная информация о законе изменения фазы сигнала.** По результатам проведенного анализа эффектов, вызванных отличием фазовой характеристики фильтра синтеза РЛИ от комплексно сопряженной фазы сигнала, можно выделить ряд информационных признаков для их использования в алгоритмах автофокусировки РЛИ в космических РСА.

В цитируемой монографии по синтезу РЛИ [274] задача автофокусировки решается в два этапа – измерение фазовых ошибок в сигнале и их компенсация. При

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

этом под сигналом понимают радиоголограмму, сжатую по дальности, а фазовые искажения рассматривают как ошибки по апертуре антенны, сфокусированной на бесконечность. При таком подходе импульсный отклик системы по азимуту является спектром входного сигнала с огибающей, равной форме ДНА антенны радиолокатора по мощности, а его фазовая характеристика – совпадающей с радиоголограммой от точечной цели. Задача автофокусировки – устранить ЛЧМ-модуляцию, включая искажения и случайные отклонения от нее, и получить на выходе БПФ сжатый импульс по азимуту. Отмечается, что алгоритмы автофокусировки и их трактовка могут иметь варианты. Так, например, перед модулем измерения ошибок можно компенсировать ЛЧМ в радиоголограмме по баллистическим данным (предварительная фокусировка [118] – как шаг гармонического анализа) и анализировать только остаточные ошибки. Если предметом автофокусировки является уже полученное комплексное РЛИ (КРЛИ), то возврат на порождающую его радиоголограмму эквивалентен вычислению спектра КРЛИ.

Информация о степени фокусировки РЛИ преимущественно содержится в откликах от точечных и компактных объектов, в их амплитудах, гистограммах распределения, ширине откликов, фазовых характеристиках. Информация, заключенная в гистограммах амплитудного распределения РЛИ, может быть использована для выбора фрагментов РЛИ (фрагментов радиоголограммы) по дальности и азимуту для проведения процедур автофокусировки с последующим распространением корректирующих поправок на весь кадр съемки или большой фрагмент маршрута.

Реальный фон местности отличается от идеальной диффузной поверхности наличием текстуры, границ участков, дорог, просек и т.д. Поэтому автокорреляционная функция РЛИ фона кроме узкого пика, характеризующего спекл-шум, может нести информацию о дефокусировке РЛИ, которую можно использовать при малом числе компактных объектов.

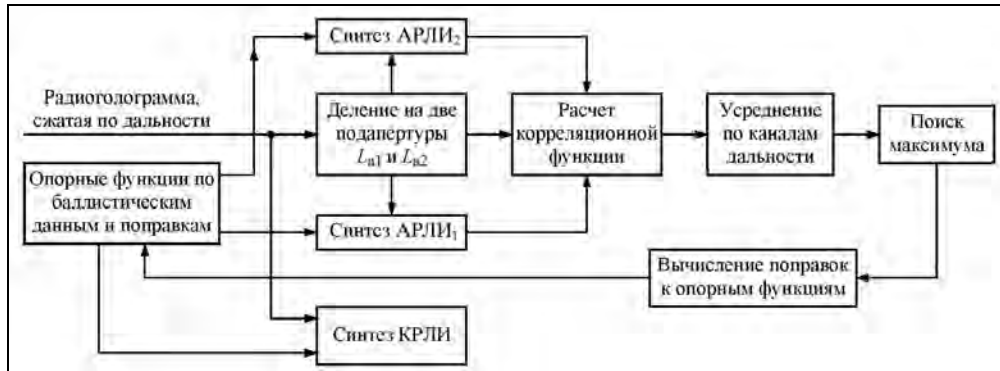
При расширении импульсного отклика, вызванного дефокусировкой, имеется возможность использовать взаимный сдвиг («смаз») парциальных РЛИ, полученных в двух неперекрывающихся уменьшенных апертурах (см. рис. 6.6,б, «размазанные» и смещенные отметки  $A_1-A_2$  и  $B_1-B_2$  при расфокусировке). На этом принципе основан алгоритм автофокусировки Mapdrift (MD) – «Смещение изображения» [274], который в русскоязычной литературе называют также «Оценка средней доплеровской частоты» [118]. Наличие азимутального смещения («смаза») отклика при дефокусировке РЛИ может рассматриваться как появление разностной доплеровской частоты между комплексными РЛИ, полученными в паре парциальных апертур. Эту разность частот можно измерить фазоразностным (Phase Difference – PD) методом. По своим возможностям он близок к алгоритму Mapdrift, но имеет преимущества по числу операций.

Дефокусировка комплексного РЛИ приводит к появлению квадратичной и более высоких порядков фазовой составляющей импульсного отклика (см. рис. 6.28). Они обусловлены фазовыми ошибками в спектре сигнала, который является аналогом радиоголограммы, если в ней компенсировать ЛЧМ (Deramped signal). Алгоритм, реализующий этот метод, носит название «фазово-градиентный автофокус» (Phase Gradient Autofocus – PGA). Высокая чувствительность формы отклика от

фазовых ошибок позволяет использовать этот алгоритм для фокусирования локальных участков КРЛИ.

Далее рассмотрены принципы построения основных алгоритмов автофокусировки РЛИ. В литературе отмечается, что эти алгоритмы при сохранении общих идей могут иметь разные варианты исполнения (а также разную производительность) в зависимости от конкретных условий их применения. Поэтому при рассмотрении мы будем учитывать особенности использования алгоритмов автофокусировки при синтезе РЛИ в космических РСА.

**Алгоритм автофокусировки по сдвигу изображения *Mapdrift*.** Структурная схема алгоритма *Mapdrift* приведена на рис. 6.39. Исходную радиоголограмму делят на две подапертуры, по каждой из которых делают синтез РЛИ с использованием опорной функции, рассчитанной на основе баллистических параметров. После детектирования каждого из амплитудных РЛИ – АРЛИ<sub>1</sub> и АРЛИ<sub>2</sub> вычисляют их корреляционную функцию.



**Рис. 6.39.** Структурная схема алгоритма автофокусировки *Mapdrift*

При выполнении алгоритма реализуются следующие процедуры:

- 1) радиоголограмму, сжатую по дальности, разбивают на две неперекрывающиеся подапертуры;
- 2) в каждой из подапертур выполняют синтез комплексных РЛИ – КРЛИ1 и КРЛИ2 по опорным функциям, сформированным по баллистической информации, известной на момент синтеза;
- 3) вычисляют модуль КРЛИ с получением амплитудных РЛИ – АРЛИ1 и АРЛИ2;
- 4) в каждом дальностном канале вычисляют корреляционную функцию по азимуту как свертку двух АРЛИ:  $R(X) = \text{АРЛИ1} \otimes \text{АРЛИ2}$ ;
- 5) усредняют корреляционную функцию по всем каналам дальности. Вид корреляционных функций для случаев точной фокусировки и дефокусировки с  $m_{df} = 1,25$  приведен на рис. 6.40,а;
- 6) определяют положение максимума усредненной корреляционной функции относительно нуля на временной оси (его можно найти по положению максимума автокорреляционной функции);

**Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА**

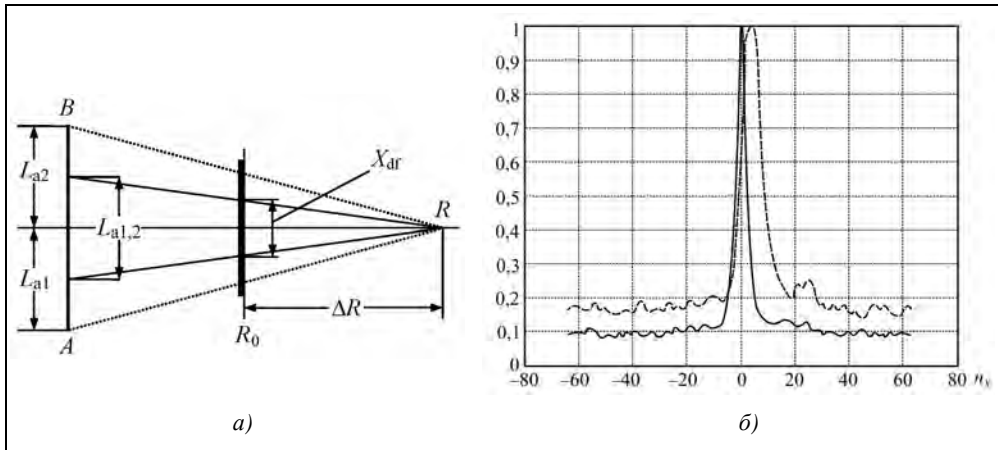
7) вычисляют поправку к параметру ЛЭС для расчета скорректированной опорной функции. Формулу для расчета поправки можно получить из геометрии оптического синтеза (антенный подход), показанной на рис. 6.40,б (сравнить с рис. 6.5,б)

$$X_{df} = \frac{L_{a1,2} \Delta R}{R} = \frac{2L_{a1,2} \Delta V_{le}}{V_{le0}}, \quad (6.65)$$

где  $L_{a1,2}$  – размер подапертур;  $X_{df}$  – измеренное смещение корреляционной функции;  $\Delta R$  – разница между расчетным  $R_0$  и истинным  $F$  фокусами радиоголограммы;  $\Delta V_{le}$  – поправка к ЛЭС;  $V_{le0}$  – расчетное значение ЛЭС.

Отсюда поправка к ЛЭС

$$\frac{\Delta V_{le}}{V_{le0}} = \frac{X_{df}}{2L_{a1,2}} = 1,56\% . \quad (6.66)$$



**Рис. 6.40.** Геометрия формирования АРЛИ подапертур (а) и вид их корреляционных функций (б) при автофокусировке РЛИ методом Mar drift: точная фокусировка (—) и дефокусировка (---) с  $m_{df}= 1,25$ , по оси ординат отложены азимутальные отсчеты корреляционной функции

Для  $m_{df}=1,25$  поправка к ЛЭС составляет 1,56 %. Знак поправки положительный, если смещение максимума положительное (увеличение масштаба РЛИ по азимуту). Это обусловлено уменьшением крутизны закона изменения фазы (фокус радиоголограммы увеличивается, лучи подапертур расходятся, как это показано на рис. 6.40,а).

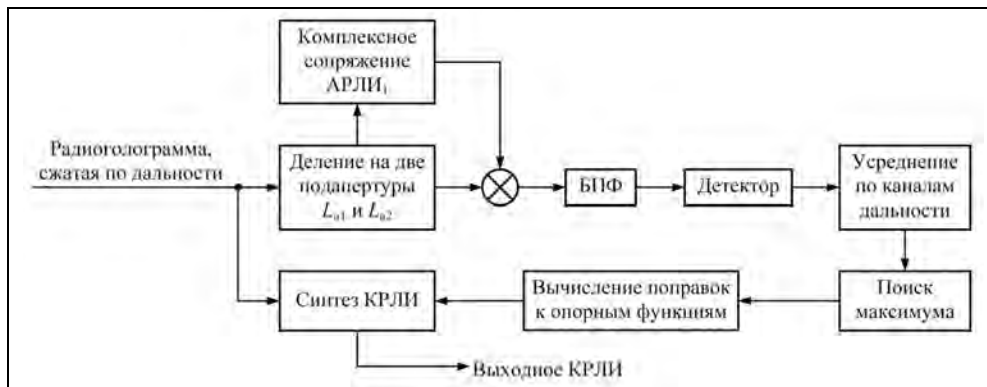
Обычно, корреляционную функцию вычисляют не по всем каналам дальности, а только по тем, где присутствуют яркие цели (около 5 %), которые находят путем пороговой обработки первичного АРЛИ или любого из парциальных АРЛИ. Такая селекция сокращает нагрузку на процессор и повышает точность фокусирования. Повышение точности также происходит при вычислении не амплитудного, а РЛИ в формате энергетической плотности – квадрат амплитудного РЛИ (ЭРЛИ), реализуемого квадратичным детектором. В случае большой начальной дефокусировки целесообразно применить несколько итераций, каждая из которых сужает пик корреляционной функции, что повышает точность оценки смещения максимума.



Особый эффект может быть достигнут в прожекторном режиме съемки с некогерентным накоплением нескольких наблюдений, когда РЛИ от каждой парциальной апертуры в результате итераций будет сходиться к РЛИ с требуемым высоким разрешением.

Особенность рассмотренного алгоритма с двумя подапертурами состоит в том, что он позволяет устранить только квадратичную ошибку фазы. Для устранения фазовых ошибок более высоких порядков радиоголограмму разделяют не на пару, а на несколько пар парциальных апертур (Multiple Aperture Mapdrift – МАМ) с совместной обработкой каждой пары АРЛИ для расчета коэффициентов разложения фазы в ряд.

**Фазоразностный алгоритм автофокусировки.** Фазоразностный алгоритм автофокусировки, структурная схема которого приведена на рис. 6.41, во многом напоминает Mapdrift, но вычислительных затрат в нем гораздо меньше. Входную радиоголограмму также делят на две подапертуры (или больше для вычисления фазовых поправок выше второго порядка), перемножают сигнал второй подапертуры и сопряженный сигнал первой подапертуры, после чего выполняют БПФ, формирующий корреляционную функцию сигналов в подапертурах, детектирование и усреднение результата по каналам дальности. После этого находят максимум корреляционной функции и вычисляют параметры опорной функции для синтеза РЛИ.



**Рис. 6.41.** Структурная схема фазоразностного алгоритма автофокусировки

В принципе данный алгоритм не требует итераций и предварительной фокусировки радиоголограммы, но она желательна (путем гетеродинирования с расчетной ЛЧМ-опорой), так как при больших смещениях могут появляться ложные максимумы. На рис. 6.42 показан вид корреляционных функций для сцены, приведенной на рис. 6.33.

Как видно из рис. 6.42,а, корреляционные функции для фазоразностного алгоритма автофокусировки более узкие (примерно в два раза), чем для алгоритма Mapdrift. При линейном детекторе они имеют зависящий от расфокусировки пьедестал (на уровне ~0,3), для устранения которого можно после детектирования вычесть постоянную составляющую. При использовании квадратичного детектора корреляционная функция обужается и пьедестал становится меньше (см. рис. 6.42,б).

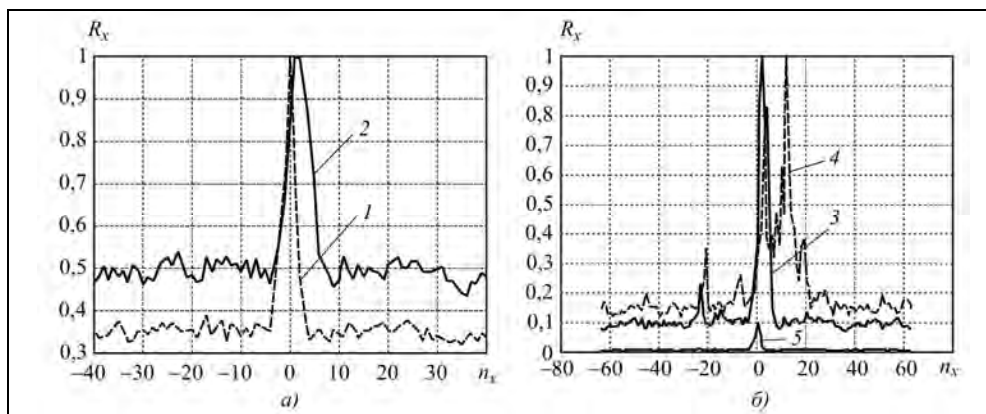


Рис. 6.42. Вид корреляционных функций при фазоразностном алгоритме автофокусировки амплитудных (а) и энергетических (б) РЛИ:  
 1 и 3 – дефокусировка  $m_{df} = 0,5$ ; 2 и 4 – дефокусировка  $m_{df} = 1,25$ ;  
 5 – уменьшенная в 10 раз кривая для сфокусированного ЭРЛИ

**Автофокусировка по сигналам от точечных отражателей.** При наличии на местности точечных отражателей сигнал от них (в радиоголограмме) является прототипом опорной функции для синтеза РЛИ после нормализации амплитуды, устранения начальной фазы и смещения доплеровской частоты (для синтеза РЛИ в прожекторном режиме и режиме Скансар). Такая опорная функция инвариантна к фазовым искажениям сигнала. При выделении сигналов от точечных целей возникают проблемы, связанные с низким отношением сигнал/шум для точечных отражателей и наличием фона местности.

Алгоритм автофокусировки по точечным отражателям удобно применять для фокусировки не радиоголограммы, а полученного по ней и расчетной опорной функции комплексного изображения (КРЛИ), представленного в виде амплитудного (АРЛИ) и фазового (ФРЛИ) изображений. По АРЛИ находят яркие отклики, формируют окно (обычно, в несколько раз превышающее ширину отклика) и, используя это окно, вырезают из АРЛИ и ФРЛИ фрагмент, который после БПФ может быть использован для корректировки фазовых ошибок в спектре КРЛИ. После шага итерации с уменьшением ширины отклика, уменьшают размер окна, пока ширина отклика не достигнет расчетного значения. Такой алгоритм применим для коррекции ошибок по азимуту и дальности (вызванных, например, аппаратурными нестабильностями или ионосферой).

Для уменьшения ошибок, обусловленных недостаточным отношением сигнал/шум, можно усреднить фазовую характеристику полученной опорной функции (в спектральной области) по набору использованных точечных отражателей. Заметим, что применение в процессе первичного синтеза РЛИ с коррекцией миграции дальности процедур масштабирования по дальности и частоте обеспечивает инвариантность опорных функций, полученных по точечным отражателям при любой их дальности в пределах кадра.

**Автофокусировка изображения методом формирования динамических фазовых портретов.** В [118] изложен метод измерения квадратичной фазовой ошибки путем формирования динамических фазовых портретов. Динамический фазовый портрет – это радиолокационное изображение сцены, получаемое с высоким пространственным разрешением. Каждая точка изображения несет информацию о разности фаз сигналов (дельта-ФРЛИ), полученных в двух каналах РСА, разнесенных во времени (а также в пространстве и во времени). В качестве таких каналов предлагается использовать симметрично расположенные подапертуры с разной длительностью.

Этот метод не предъявляет требований к «точности» объекта. В результате обработки полученных данных вычисляются квадратичный коэффициент разложения временного закона фазы  $C_2 = d^2\varphi/2dt^2$ , определяющий значение ЛЭС. Структурная схема алгоритма основана на поиске максимума апостериорной плотности вероятности оценки коэффициента  $C_2$  с учетом априорной плотности вероятности распределения ошибок навигационных датчиков. Показано, что оптимальное соотношение длительностей подапертур составляет 0,6...0,8. Применение этого метода может быть рекомендовано для случаев, когда интервал корреляции фазовых флуктуаций соизмерим с апертурой синтеза РЛИ (РСА авиационного базирования или космические РСА метрового диапазона с сильным деструктивным влиянием ионосферы).

**Энтропийный алгоритм автофокусировки.** В основе энтропийного алгоритма [508] лежит идея минимизации некоторой функции качества изображения по фазе опорной функции. В качестве такой целевой функции, например, используют энтропию изображения

$$E = \sum_x \sum_r P(x, r) \log_2 P(x, r), \quad (6.67)$$

где 
$$P = \frac{|RLI(x, r)|^2}{\sum_x \sum_r |RLI(x, r)|^2}.$$

Работа алгоритма заключается в итерационном процессе минимизации целевой функции энтропии в пространстве фазы опорной функции. Фактически, алгоритм пытается получить наиболее контрастное изображение, подобрав соответствующую фазу опорной функции.

В практике синтеза РЛИ наиболее широко применяется фазово-градиентный алгоритм автофокусировки PGA. Он рассмотрен в следующем подразделе.

#### **6.10.6. Фазово-градиентный алгоритм автофокусировки**

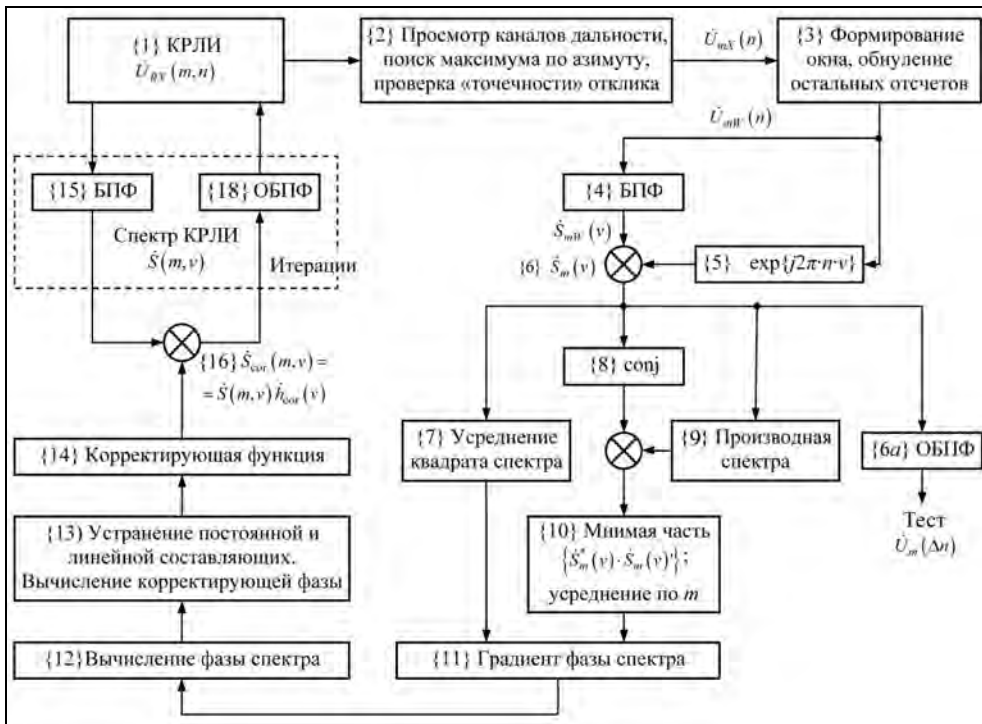
Одним из наиболее эффективных и широко используемых при синтезе РЛИ алгоритмов автофокусировки является фазово-градиентный алгоритм автофокусировки PGA [274, 497], основанный на извлечении некомпенсированной фазовой ошибки непосредственно из ярких точечных целей. Теоретическое обоснование алгоритма, приведенное в [274], исходило из синтеза РЛИ с использованием для сжатия по азимуту метода гармонического анализа. Входным процессом для работы алгоритма PGA в этом случае является предварительно сжатая по дальности (с коррекцией ми-

**Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА**

грации) радиоголограмма, в которой скомпенсирован (deramped) закон ЛЧМ с остаточными отклонениями, требующими устранения. Получаемое в каждом канале дальности комплексное РЛИ представляет собой спектр радиоголограммы. Применением ОБПФ возможна обратная операция перехода от КРЛИ к радиоголограмме с частично (на данном шаге итераций) скомпенсированными отклонениями.

Существует много вариантов реализации алгоритма PGA. Его усовершенствованные модификации используют в качестве входного процесса частично сфокусированное КРЛИ, компенсацию фазовых ошибок выполняют в спектре КРЛИ по азимуту, что не противоречит первоначальной идее метода в связи с эквивалентностью процедур БПФ и ОБПФ (с точностью до множителей).

Алгоритм PGA имеет преимущества компенсации фазовых ошибок по апертуре синтеза РЛИ независимо от их закона. Принцип работы алгоритма основан на развитии и конкретизации метода автофокусировки по точечным отражателям. Структурная схема рабочего варианта алгоритма показана на рис. 6.43, где входным сигналом является КРЛИ, синтезированное по известным баллистическим данным.



**Рис. 6.43.** Схема фазово-градиентного алгоритма автофокусировки PGA

Алгоритм автофокусировки PGA базируется на вычислении градиента фазы спектра КРЛИ за вычетом постоянной фазы и линейной зависимости фазы от азимутальной координаты. Принципиально этот метод можно применить и для автофокусировки КРЛИ по дальности, например, с целью компенсации нестабильностей ионосферы [241\*, 468\*].

### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

Рассматриваемый вариант алгоритма PGA включает следующую последовательность шагов, которые циклически повторяются:

- 1) поиск каналов дальности, содержащих отклики от ярких точечных целей (Prominent points selection);
- 2) локализация отклика от точечной цели в окне (Windowing);
- 3) циклический сдвиг откликов (Shifting) к нулевой пространственной (или доплеровской) частоте;
- 4) суммирование спектров откликов по каналам дальности;
- 5) оценка градиента фазовой ошибки (Phase gradient estimation);
- 6) коррекция КРЛИ путем компенсаций фазовой ошибки.

Ввиду важности данного алгоритма автофокусировки рассмотрим его работу более подробно с иллюстрацией на модели, реализованной в среде MATLAB. Воспользуемся упрощенной моделью КРЛИ  $\dot{U}_{RX}(m, n)$ , в которой имеются два канала дальности, содержащих строки по азимуту с откликами от одиночных точечных целей.

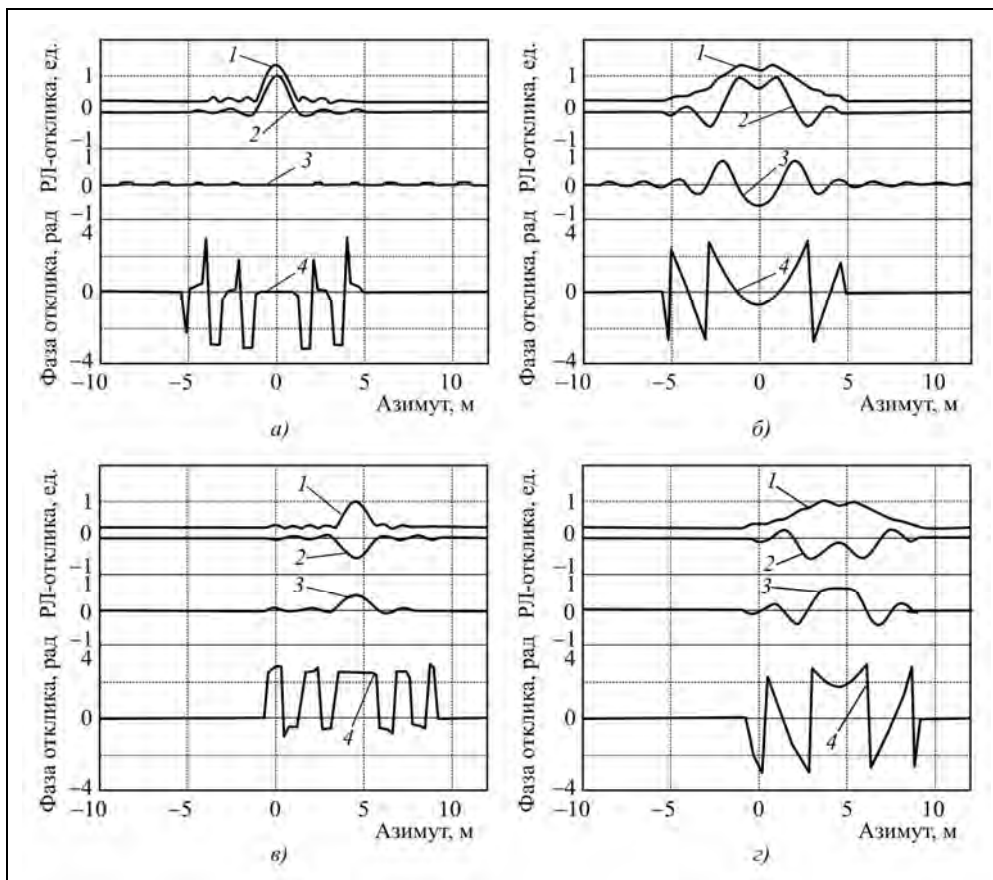
**Модель исходного КРЛИ.** Исходное КРЛИ формируется путем моделирования процесса получения радиоголограммы и последующего синтеза РЛИ методом быстрой свертки. Для простоты рассмотрим модель радиоголограммы с двумя каналами дальности ( $m=1$  и  $m=2$ ), в каждом из которых находятся по одной цели. Параметры модели РСА и КРЛИ приведены в табл. 6.4. В первом канале с  $m=1$  цель 1 с амплитудой 1 ед. расположена точно в центре кадра. Ее азимутальная координата  $X_1=0$ . Во втором канале дальности цель 2 имеет амплитуду 0,7 ед. и азимутальную координату  $X_2=4,48$  м относительно центра кадра.

**Таблица 6.4. Параметры РСА и исходного КРЛИ для моделирования алгоритма автофокусировки PGA**

Параметр, размерность	Обозначение	Значение
Длина волны РСА, см	$\lambda$	9,375
Горизонтальный размер антенны, м	$D_{\text{ант}}$	2
Путевая скорость, м/с	$V$	7000
Наклонная дальность целей, м:		
цель 1, канал дальности $m=1$	$R_{01}$	3750,00
цель 2, канал дальности $m=2$	$R_{02}$	3753,94
Частота квантования сигнала по дальности, МГц	$F_s$	300
Частота повторения зондирующего сигнала, Гц	$F_p$	30000
Амплитуда сигнала от целей в каналах дальности $m = 1 / 2$ , ед.	$U_0$	1,0 / 0,7
Азимутальные координаты целей 1 / 2 относительно центра кадра, м	$X_1 / X_2$	0 / 4,48
Размер строки по азимуту	$X_{\text{max}}$	1024
Масштаб РЛИ по азимуту, м	$M_X$	0,233
Отношение сигнал/шум+фон для цели 1, дБ	$S/N$	30
Расчетное разрешение РСА по азимуту, м	$\rho_X$	1
Коэффициент дефокусировки исходного РЛИ	$m_{\text{df}}$	7

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Результаты моделирования работы процедур, входящих в алгоритм PGA, иллюстрируют рис. 6.44–6.51. На приведенных графиках по оси абсцисс симметрично относительно нуля отложены либо азимутальные отсчеты КРЛИ  $nM_X$  в метрах, где  $M_X$  – масштаб РЛИ по азимуту, либо значения пространственных частот (размерность – 1/метр). Для наглядности выбран малый шаг квантования по азимуту ( $M_X=0,233$  м) и большое отношение сигнал/фон+шум (30 дБ). Длина волны РСА составляет  $\lambda=9,375$  см. Анализируются два варианта исходного КРЛИ – точно сфокусированное КРЛИ и частично сфокусированное РЛИ с коэффициентом дефокусировки  $m_{df}=7$ .



**Рис. 6.44.** Форма комплексных откликов от ярких точечных целей в каналах дальности:

- a–б* – цель 1 в центре кадра по азимуту ( $m=1, n=0$ );
- в–з* – цель 2 смещена на 4,5 м по азимуту ( $m=2, n=20$ );
- a, в* – точная фокусировка РЛИ; *б, з* – расфокусированное РЛИ с  $m_{df}=7$ ;
- 1* – огибающая отклика, смещена вверх для наглядности;
- 2* – действительная составляющая отклика;
- 3* – мнимая составляющая; *4* – фаза отклика

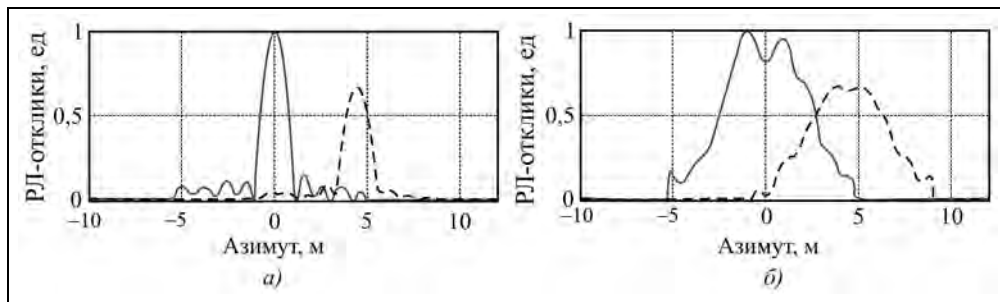
Составляющие комплексного отклика для цели 1 показаны на рис. 6.44, а, б. Задана наклонная дальность цели 1, кратная длине волны РСА. Поэтому для точно сфокусированного КРЛИ (рис. 6.44, а) в центре кадра мнимая составляющая 3 и фаза 4 отклика в пределах главного лепестка равны нулю. По мере удаления от главного лепестка изменения фазы отклика в пределах  $\pm\pi$  приобретают случайный характер, что обусловлено боковыми лепестками синтезированной ДН, а также случайными сигналами от фона местности и шумами приемника.

При расфокусировке КРЛИ с  $m_{df} = 7$  (рис. 6.44, б) фаза отклика от цели в главном лепестке меняется по параболическому закону, а составляющие отклика приобретают вид, характерный для ЛЧМ-процесса.

Во втором канале (рис. 6.44, в, г) содержится отклик от смещенной на 4,5 м по азимуту цели 2, имеющей амплитуду 0,7 ед. По наклонной дальности цель 2 смещена на  $\sim 0,4$  м. Основное отличие откликов от целей 1 и 2 – в значениях начальной фазы, что сопровождается изменением соотношения между действительной и мнимой составляющими отклика.

**Последовательность процедур автофокусировки.** В исходном частично сфокусированном КРЛИ  $\dot{U}_x(m, n)$  (или в КРЛИ, получаемом после каждой итерации) находят каналы дальности, содержащие отклики от ярких точечных целей, пригодные для автофокусировки (подраздел 6.10.7). Обычно в канале дальности выбирают один отклик с наибольшей амплитудой и определяют номер азимутального отсчета  $n$  с максимальным уровнем. Приведенные на рис. 6.44 модели откликов от точечных целей соответствуют выходу программного модуля {2} структурной схемы (см. рис. 6.43).

В окрестностях найденных откликов от точечных целей формируют окно {3}, за пределами которого обнуляют азимутальные отсчеты (рис. 6.45). Размер окна зависит от ожидаемого разрешения РЛИ по азимуту при расчетных погрешностях измерения траекторных параметров. В процессе итераций возможно изменение размеров окна для устранения помех от окружающего фона местности.



**Рис. 6.45.** Отклики от целей  $U_{mW}(n)$  в каналах дальности  $m=1$  (сплошные линии) и  $m=2$  (пунктир) после оконной фильтрации (поз. {3} на схеме):  
 а – точная фокусировка РЛИ; б – расфокусированное РЛИ

Далее производят циклический сдвиг отклика к нулевой пространственной частоте. Это можно реализовать в спектральной области с помощью последовательно-

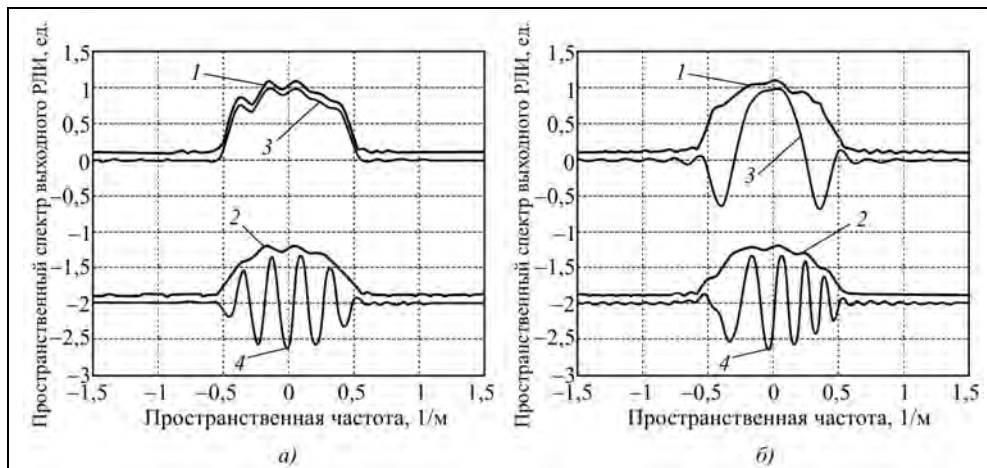
## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

сти процедур: БПФ {4}, умножения спектра на частотный множитель {5}, зависящий от смещения отметки из центра кадра, и ОБПФ. Поскольку дальнейшие операции проводятся в спектральной области, ОБПФ используем только для тестирования процедуры сдвига откликов к нулевой частоте (поз. {6a} на структурной схеме). Формула для вычисления спектра сдвинутого к нулю отклика имеет вид (поз. {6})

$$\begin{aligned} \dot{S}_m(v) &= \text{FFT}\{\text{fftshift}(\dot{U}_{mW}(n))\} \exp(j2\pi n_m v) = \\ &= \dot{S}_{mW}(v) \exp(j2\pi n_m v), \end{aligned} \quad (6.68)$$

где  $n = -M_{\text{xFFT}}/2 : M_{\text{xFFT}}/2 - 1$  – строка азимутальных отсчетов исходного КРЛИ;  $v = (-M_{\text{xFFT}}/2 : M_{\text{xFFT}}/2 - 1)M_X^{-1}$  – строка частотных отсчетов пространственного спектра исходного РЛИ;  $M_X$  – масштаб отсчетов по азимуту;  $n_m$  – номер азимутального отчета для максимума отклика в канале дальности с номером  $m$ ;  $\text{fftshift}(\ast)$  – записанная в нотации MATLAB процедура сдвига нулевых отсчетов по оси абсцисс в центр массива данных и обратно;  $\dot{S}_{mW}(v) = \text{FFT}\{\text{fftshift}(\dot{U}_{mW}(n))\}$  – спектр выделенной в окне цели.

Огибающие спектра сдвинутых откликов приведены на рис. 6.46 (кривые 2). Они близки к форме ДНА радиолокатора ( $\text{sinc}^2$ ), учтенной при формировании радиоголограммы и практически совпадают для фокусированного и расфокусированного РЛИ. Заметим, что ширина пространственного спектра КРЛИ составляет около  $1 \text{ м}^{-1}$ . Это соответствует расчетной разрешающей способности РЛИ  $1 \text{ м}$ . Между тем, ширина показанных на рис. 6.45, б импульсных откликов по уровню минус 3 дБ составляет 3,5 м, что обусловлено дефокусировкой, введенной в модель исходного КРЛИ.



**Рис. 6.46.** Форма огибающих (кривые 1 и 2) и действительных составляющих (кривые 3 и 4) спектра сигнала по азимуту на выходе БПФ {4}:  
1, 3 – цель 1 в центре кадра, 2, 4 – цель 2 смещена по азимуту; а – точная фокусировка РЛИ;  
б – расфокусированное РЛИ



Для цели 1 в центре кадра при точной фокусировке действительная составляющая спектра отклика совпадает с огибающей (мнимая равна нулю), а для смещенной из центра цели – имеет вид синусоиды. Для расфокусированного РЛИ действительные составляющие спектра отклика являются ЛЧМ-процессом. Эти явления подтверждаются законами изменения фазы в пределах огибающей спектра, как это показано на рис. 6.47, а, б. Для фокусированного РЛИ фаза спектра при смещении цели из центра кадра получает линейный набег, а при расфокусировке – параболическую составляющую.

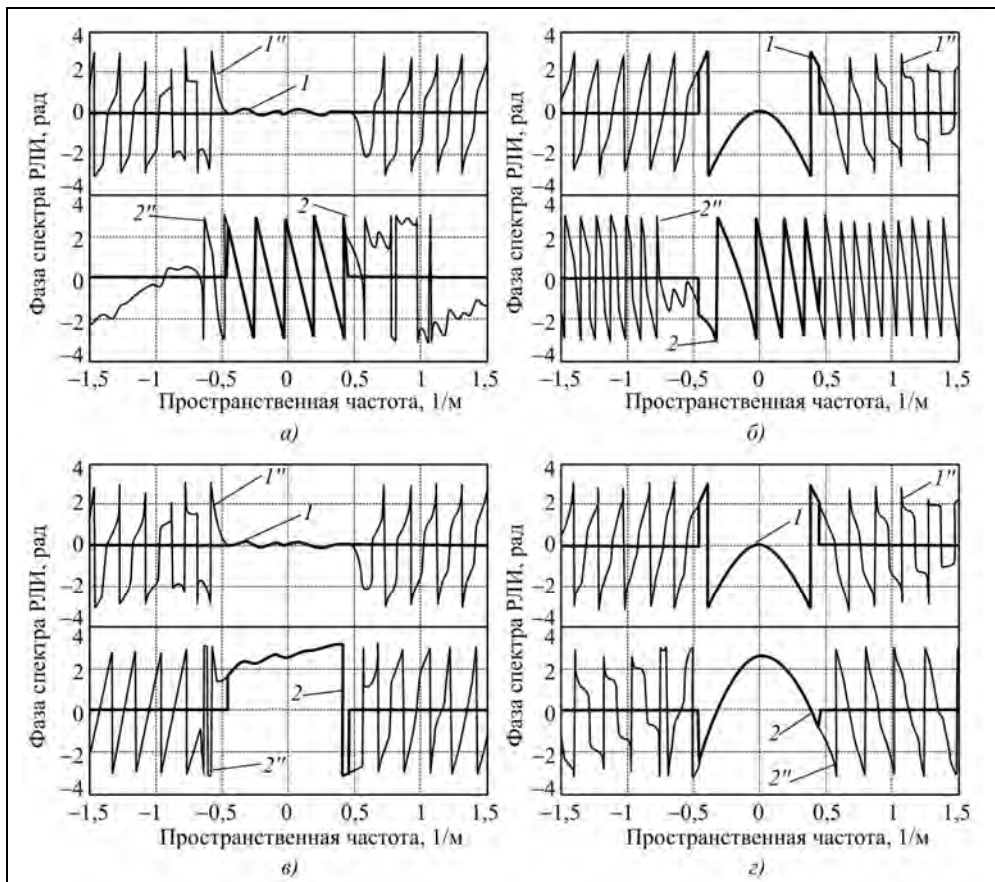


Рис. 6.47. Фаза спектра откликов на выходе БПФ {4} (а, б) и после сдвига к нулевой частоте {б} (в, з):

а, в – точная фокусировка РЛИ; б, з – расфокусированное РЛИ; цель 1 (линии 1, 1'') в центре кадра, цель 2 (линии 2, 2'') смещена по азимуту: жирными линиями показана фаза спектра, ограниченного полосой по уровню минус 3 дБ

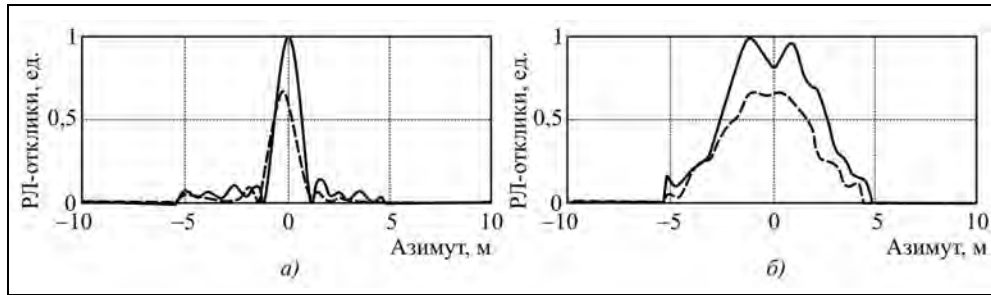
Фаза спектра от точечной цели имеет два характерных участка – центральный, равный ширине спектра КРЛИ, с регулярным законом изменения фазы и область склонов спектра со случайными флуктуациями фазы, вызванные шумами и

интерференцией сигналов от фона местности, которые могут быть обнулены в процессе обработки.

Для случая точной фокусировки (рис. 6.47,*a*) фаза регулярного участка постоянна для цели 1 или меняется по линейному закону (для цели 2), что означает сдвиг по частоте, пропорциональный смещению отклика от центра кадра.

На рис. 6.47,*б,г* приведены фазы спектров сигналов от целей после смещения их к нулевой частоте. Компенсация частотного сдвига (кривая 2) приводит к уменьшению размаха изменений фазы на регулярном участке. Остаточное линейное изменение фазы вызвано несимметрией формы отклика или смещением максимума отклика относительно ближайшего дискрета выборок.

На рис. 6.48 приведены отклики сигналов от целей после их сдвига к нулевой частоте. Относительное смещение откликов вызвано рассогласованием истинного положения цели по азимуту и дискретностью корректирующей функции {14} (см. рис. 6.43) с шагом, определяемым базой БПФ.



**Рис. 6.48.** Отклики от целей  $U_{mw}(n)$  в каналах дальности  $m=1$  (сплошные линии) и  $m=2$  (пунктир) после их оконной фильтрации и сдвига к нулевой частоте {6а}:  
*a* – точная фокусировка РЛИ; *б* – расфокусированное РЛИ

Следующий шаг алгоритма РГА состоит в вычислении градиента фазы спектра КРЛИ согласно [274]. Представим спектр процесса в виде произведения огибающей на фазовый множитель  $\dot{S}_W(\nu) = S_0(\nu)e^{j\varphi(\nu)}$ , где  $S_0(\nu)$  – огибающая спектра,  $\varphi(\nu)$  – фаза спектра. Производная спектра по пространственной частоте  $\nu$  имеет вид

$$\dot{S}_W(\nu)' = e^{j\varphi(\nu)}S_0(\nu)' + jS_0(\nu)e^{j\varphi(\nu)}\varphi(\nu)' = e^{j\kappa(\nu)}S_0(\nu)' + j\dot{S}_W(\nu)\varphi(\nu)'. \quad (6.69)$$

Умножив (6.69) на комплексно сопряженный спектр отклика  $\dot{S}_W^*(\nu)$

$$\dot{S}_W(\nu)'\dot{S}_W^*(\nu) = S_0(\nu)S_0^*(\nu)' + jS_0^2(\nu)\varphi(\nu)', \quad (6.70)$$

получим выражение для вычисления градиента фазы спектра (ее производной по пространственной частоте)

$$\varphi_m(\nu)' = \frac{\text{Im}[\dot{S}_{Wm}(\nu)'\dot{S}_{Wm}^*(\nu)]}{|\dot{S}_{Wm}(\nu)|^2}, \quad (6.71)$$

где индекс  $m$  определяет номера выделенных каналов дальности, содержащих точечные цели для автофокусировки РЛИ.

Вычисление градиента фазы спектра по формуле (6.71) и ее последующее усреднение по каналам дальностей  $m$  включает в себя набор операций {7}–{11} (см. рис. 6.43):

1) вычисление производной спектра по частоте {9} конечно-разностным методом применением дифференцирующего фильтра (в простейшем случае без сглаживания флуктуаций – с помощью процедуры MATLAB  $\dot{S}_{Wm}(v)' = \text{diff}(\dot{S}_{Wm}(v))$ ) или, используя ОБПФ {6a}, умножение на линейный множитель (с соответствующим масштабированием по азимуту и амплитуде) и последующее БПФ  $\dot{S}_{Wm}(v)' \leftarrow \text{FFT}\{\text{IFFT}(\dot{S}_{Wm}(v))j2\pi x\}$ ;

2) вычисление мнимой части {10} от  $\dot{S}_W(v)' \dot{S}_W^*(v)$  и усреднение ее по каналам  $m$ . Практически производится суммирование мнимых частей, поскольку далее выполняют деление на сумму квадратов спектра;

3) усреднение (суммирование) квадрата спектра  $S_{0m}(v)^2$  по  $m$  {7};

4) вычисление усредненного градиента фазы подстановкой в выражение (6.71) суммарных значений мнимой части квадрата спектра:

$$\hat{\varphi}(v)' = \text{mean} \left\{ \frac{d\varphi(v)}{dv} \right\} = \frac{\sum_m \text{Im}\{\dot{S}_{Wm}(v)' \dot{S}_{Wm}^*(v)\}}{\sum_m |\dot{S}_{Wm}(v)|^2}. \quad (6.72)$$

На практике в отличие от рассмотренного выше выбора  $m$  каналов дальности с одной яркой целью возможно для автофокусировки использовать несколько целей из одного канала дальности. Это облегчает задачу автофокусировки РЛИ сельских районов с малым числом компактных отражателей. В этом варианте в звене {2} схемы (см. рис. 6.43) выделяют несколько ярких целей с последовательно уменьшающимися амплитудами и образуют несколько виртуальных каналов с дополнительными номерами  $m$ , в которых формируют окна {3} с отметками от целей, обнуляя остальные отсчеты азимутальной строки.

Усредненная зависимость градиента фазы спектра от пространственной частоты приведена на рис. 6.49. Жирными линиями  $I$  выделен полезный интервал изменения градиента фазы. Тонкими линиями  $I''$  обозначена остальная часть.

Дадим интерпретацию полученных зависимостей применительно к синтезу РЛИ во временной области. Градиент фазы спектра КРЛИ является аналогом частотной поправки к опорной функции при синтезе РЛИ во временной области (радиоголограммы). Для сфокусированного исходного РЛИ (рис. 6.49,а) эта поправка практически равна нулю по всей протяженности радиоголограммы (ширине спектра  $\Delta S_{RX}$ , отмеченного стрелками на рисунке). Для расфокусированного РЛИ (рис. 6.49,б) при  $t=0$  (центр строки сигнала) частотная поправка в опорной функции равна нулю (отсутствует сдвиг по азимуту), а по апертуре синтеза требуется ее умножение на ЛЧМ-зависимость для согласования откорректированной опорной функции с крутизной закона ЛЧМ принимаемого сигнала.

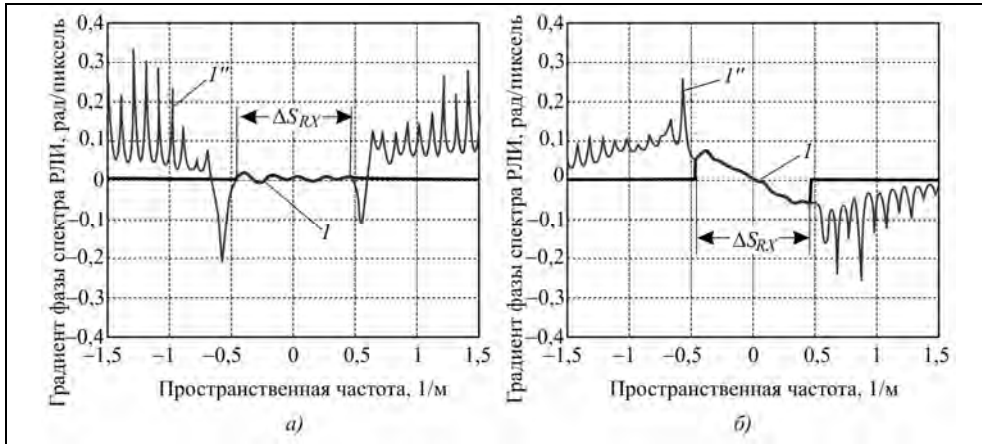


Рис. 6.49. Зависимость градиента фазы спектра от пространственной частоты:  
 а – точная фокусировка РЛИ; б – расфокусированное РЛИ

Проинтегрировав градиент фазы, получаем показанную на рис. 6.50 фазовую поправку {12} к спектру КРЛИ (для дифференцирования и интегрирования в среде MATLAB применяют процедуры `diff(*)` и `sumsum(*)`). Учитываем требование к опорной функции синтеза КРЛИ (и к корректирующей функции), чтобы она имела нулевую начальную фазу и нулевой частотный сдвиг, сохраняя на КРЛИ фазу сигнала, принятого от объекта наблюдения, и азимутальное положение отклика относительно привязанного к географическим координатам центра кадра. Иначе возникнут проблемы при тематической обработке полученного РЛИ, особенно при интерферометрии.

Поэтому после интегрирования устраняют постоянную и линейную составляющие фазы {13} на схеме (см. рис. 6.43), например, так:

$$\varphi(v) = \varphi(v) - \frac{\varphi(v_{\max}) - \varphi(v_{\min})}{v_{\max} - v_{\min}} v, \quad (6.73)$$

где  $v_{\min} = v(1)$  и  $v_{\max} = v(X_{\max})$  – минимальное и максимальные значения аргумента по азимутальной строке. Вид фазовой характеристики корректирующей функции {14} показан на рис. 6.50.

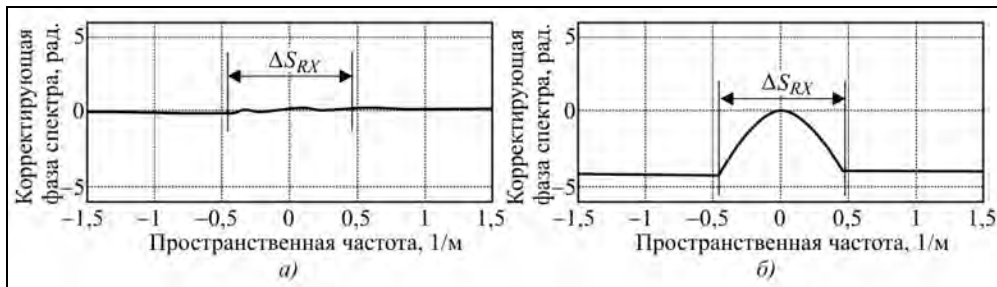


Рис. 6.50. Фаза корректирующей функции спектра КРЛИ:  
 а – точная фокусировка РЛИ; б – расфокусированное РЛИ

После умножения спектра исходного КРЛИ {16} на корректирующую функцию {14}  $h_{\text{кор}}(v) = \exp\{-\varphi_{\text{кор}}(v)\}$  имеем скорректированный спектр КРЛИ {17}  $\dot{S}_{\text{кор}}(m, v)$ , который после ОБПФ {18} преобразуется в скорректированное КРЛИ. Им заменяют исходное КРЛИ {1} для выполнения очередной итерации или использования в качестве выходного продукта – сфокусированного КРЛИ:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{RX\text{кор}}(m, n) &= \text{fftshift}\left(\text{IFFT}\left\{\dot{S}_{\text{кор}}(m, v)\right\}\right) = \\ &= \text{fftshift}\left(\text{IFFT}\left\{\dot{S}(m, v)\exp(-j\varphi_{\text{кор}}(v))\right\}\right). \end{aligned} \quad (6.74)$$

Для получения высокой точности фокусировки выполняют несколько итераций с указанной последовательностью процедур. В случаях, когда параметры дефокусировки исходного РЛИ изменяются по полю кадра, применяют процедуру локальной автофокусировки (см. подраздел 6.10.8).

Результат коррекции КРЛИ приведен на рис. 6.51. Разрешающая способность КРЛИ после компенсации фазовых ошибок составляет около 1 м, что согласуется с шириной спектра КРЛИ. Показанные на рис. 6.51, б и г огибающие, действительные и мнимые составляющие откликов от целей 1 и 2 после применения процедуры PGA к дефокусированному исходному КРЛИ (рис. 6.44, б и г, кривые 1–3) имеют идентичную форму с откликами исходного сфокусированного КРЛИ, представленными на рис. 6.44, а и в, кривые 1–3. (они совпадают также с кривыми 1–3 на рис. 6.51, а, в). Это свидетельствует о корректности рассмотренной процедуры автофокусировки PGA.

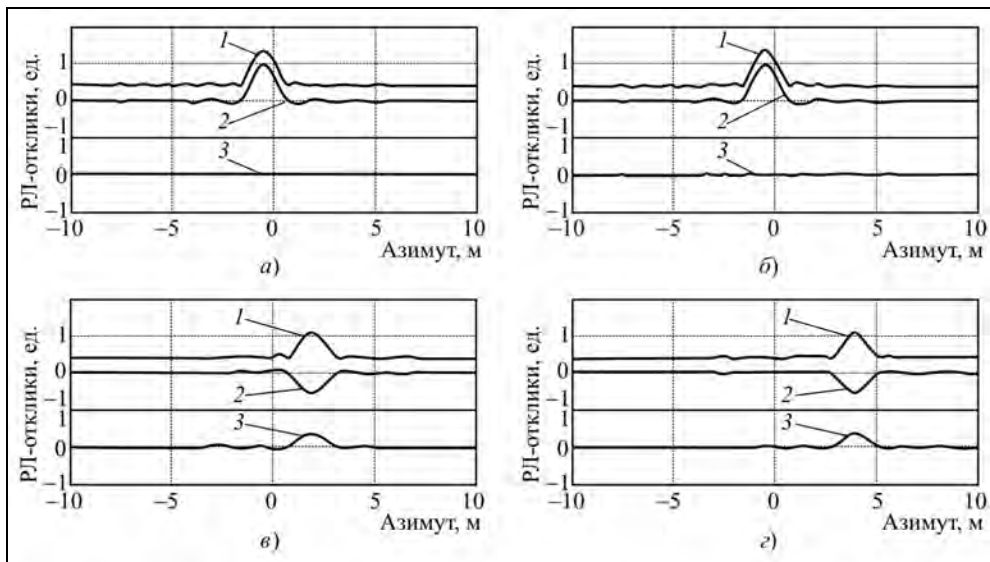


Рис. 6.51. Форма откликов после автофокусировки КРЛИ:

а, б – цель 1 в центре кадра; в, г – цель 2, смещенная по азимуту; а, в – сфокусированное исходное КРЛИ; б, г – расфокусированное исходное РЛИ; 1 – огибающая отклика (смещена вверх для наглядности); 2 – действительная составляющая отклика; 3 – мнимая составляющая

При проведении автофокусировки методом РГА следует учитывать, что размер окна ограничивает наивысшую частоту коррекции фазы. Окно должно быть достаточно большим, чтобы все частотные компоненты ошибки передались в спектральную область. При малом окне компенсируются только низкочастотные компоненты изменения фазы по апертуре синтеза (азимутальному спектру КРЛИ). Такая ситуация, в частности, более типична для космических РСА в отличие от самолетных РСА, в которых траекторные флуктуации имеют малый интервал корреляции, соизмеримый с апертурой синтеза РЛИ.

К достоинствам фазово-градиентного алгоритма следует отнести то, что он дает хорошую точность фокусирования изображения и сходится за небольшое число итераций. Также существуют модификации РГА (QPGA [279, 389]), сходящиеся за одну итерацию. К недостаткам РГА следует отнести то, что для его работы требуется большое количество мощных точечных целей, чего в реальных сценах может и не быть.

К недостаткам алгоритма РГА следует отнести чувствительность к «качеству» отражателей, а также повышенные вычислительные затраты, связанные с требованием выполнения нескольких итераций. Существует вариант метода РГА, не требующий проведения итераций NPGA [389, 497]. Вместо этого можно использовать усреднение градиентов фазы, вычисленных не по одному, а по нескольким откликам от ярких точечных целей, найденных строках по азимуту в соответствующих каналах дальности. Такая возможность имеется при съемке застроенных территорий или местности, содержащей инженерные сооружения (опоры ЛЭП, мосты и др.)

### **6.10.7. Процедура поиска откликов для автофокусировки РЛИ**

При рассмотрении алгоритмов автофокусировки отмечена критичность большинства из них к «качеству» отражателей, отклики от которых используют для вычисления поправок к опорной функции синтеза РЛИ. Главными факторами качества являются их близость к точечным отражателям и отношение сигнал/шум+фон. Реальные объекты (кроме однородной отражающей поверхности), как правило, представляют собой групповые цели. Отраженный от них сигнал является когерентной суммой отражений от фрагментов объекта, причем характер суммарного отклика от реального объекта зависит от его конфигурации, а также длины волны РСА, расчетной разрешающей способности РСА, ширины и фазового распределения в дефокусированном импульсном отклике от точечной цели. Проблема поиска точечных объектов для автофокусировки РЛИ актуальна как для РСА высокого разрешения 0,5...1 м, так и для РСА со средним пространственным разрешением (7...10 м). Опыт эксплуатации РСА «Меч-КУ» показал, что среди ярких объектов с высоким контрастом над окружающим фоном к точечным объектам нельзя, в частности, отнести ни опоры линий электропередач, ни палубные надстройки кораблей, ни множество инженерных конструкций. В настоящее время благодаря применению на борту КА высокоточной аппаратуры позиционирования задача фокусирования РЛИ среднего разрешения в РСА, работающих в традиционных диапазонах волн (3...23 см), решается без применения автофокусировки, но она остается актуальной для РСА метровых диапазонов волн.

Во многих случаях для упрощения обработки ограничиваются поиском одной яркой цели в канале дальности, выбранном для вычисления поправки к опорной функции (см. подраздел 6.10.6). Общее число таких целей может оказаться малым, что приводит к большому числу итераций для достижения нужной точности. Более продуктивным является использование большего числа точек в канале дальности. Поэтому анализ «качества» откликов от реальных объектов и их пригодности для целей автофокусировки РЛИ высокого разрешения является важной прикладной задачей. Методика основана на формировании плавающего порога для измерения ширины импульсного отклика РСА по заданному уровню и сравнению ширины отклика с его теоретическим значением при точной фокусировке. Структурная схема анализа и выделения квазиточечных отметок для проведения автофокусировки приведена на рис. 6.52.



Рис. 6.52. Структурная схема выделения и анализа отметок от целей

Рассмотрим методику проведения такого анализа на примере радиолокационного снимка с разрешающей способностью  $\sim 1$  м, полученного с помощью РСА X-диапазона волн TerraSAR-X. Исходным является комплексное КРЛИ. В выбранном для анализа фрагменте РЛИ, показанном на рис. 6.53, имеется река 1 с двумя мостами – малым для местного проезда 2 и автомобильным 3, прибрежные парковые зоны 4 и городская застройка 5. Азимутальная ось направлена вверх, направление обзора – справа.

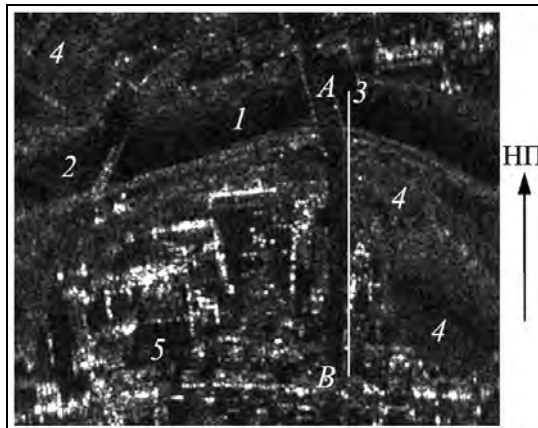


Рис. 6.53. Оценка «качества» радиолокационных откликов от объектов разных типов (фрагмент РЛИ г. Розенхайм, TerraSAR-X, Infoterra © [530]); сечение РЛИ вдоль линии А–В приведено на рис. 6.54

Процедура оценки откликов выполняется в следующей последовательности:

1) КРЛИ интерполируют по азимуту методом раздвижки спектра с увеличением базы в два раза;

2) выполняют квадратичное детектирование (получение ЭРЛИ), что позволяет снизить вклад отражателей малой мощности, расположенных вблизи с главным максимумом;

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

3) задают значение постоянного порога для отсева откликов от однородной поверхности

$$D_{\text{por\_g}} = K_{\text{por\_g}} \frac{1}{N} \sum D(n_x), \quad (6.75)$$

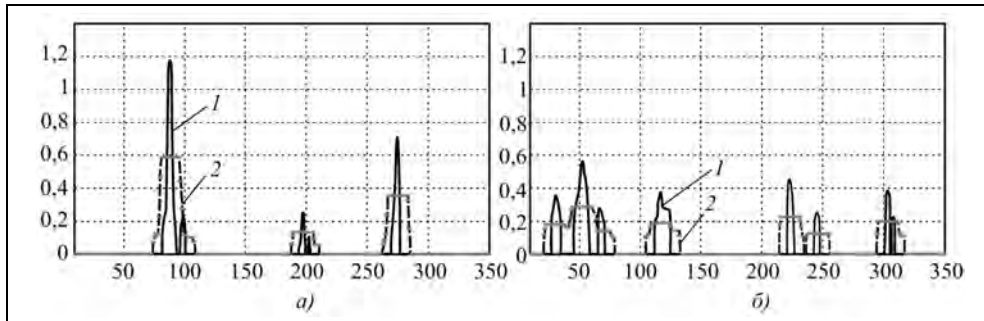
где  $K_{\text{por\_g}} = 1 \dots 4$  – коэффициент порога для отсеивания откликов от однородной протяженной поверхности;  $D(n_x)$  – текущие азимутальные отсчеты ЭРЛИ в канале дальности;  $N$  – число азимутальных отсчетов. Сравнивают отсчеты ЭРЛИ с порогом и обнуляют все отсчеты ниже порога;

4) формируют функцию плавающего порога с окном (плоским горизонтальным участком), ширину которого задают с небольшим превышением ожидаемой ширины расфокусированного отклика от точечной цели. Пример формирования плавающего порога иллюстрирует рис. 6.54. Значение пороговой функции рассчитывают по формуле

$$D_{\text{por}}(n_x + k) = \begin{cases} K_{\text{por}} D(n_x), & \text{если } D_{\text{por}}(n_x + k) \leq K_{\text{por}} D(n_x), \\ D_{\text{por}}(n_x + k), & \text{если } D_{\text{por}}(n_x + k) > K_{\text{por}} D(n_x) \end{cases} \quad (6.76)$$

$$\text{при } -\Delta k/2 \leq k < \Delta k/2,$$

где  $\Delta k$  – ширина порогового окна;  $K_{\text{por}} = 0,5$  – коэффициент плавающего порога, выбранный соответственно ширине отклика на уровне минус 3 дБ;



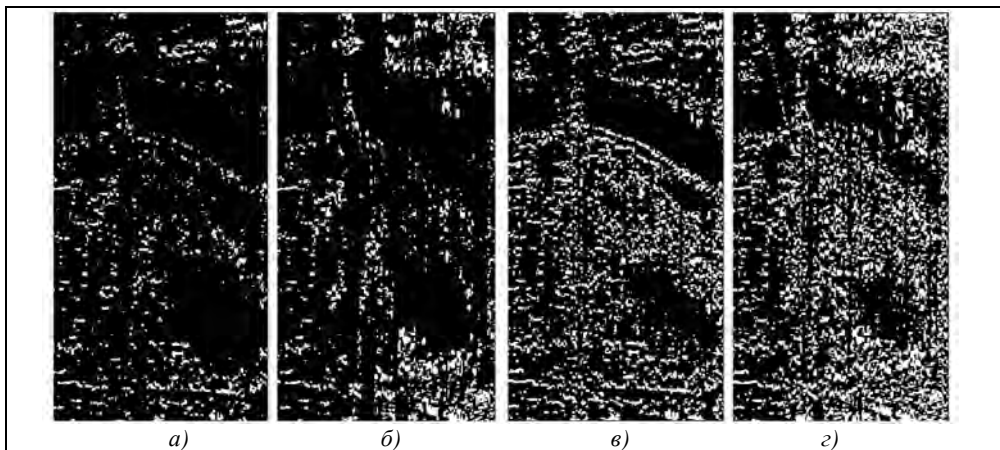
**Рис. 6.54.** Формирование плавающего порога в канале дальности (линия А–В на рис. 6.53, а) для сфокусированного РЛИ (а) и при расфокусировке с  $m_{\text{дф}}=6$  (б):  
1 – сигнальная функция ЭРЛИ, 2 – плавающий порог, уровень минус 3 дБ;  
по оси абсцисс – азимутальные отсчеты, по оси ординат – относительные величины

5) выполняют пороговую обработку по плавающему порогу с формированием «маски» (признака о выборе отклика для фокусировки), определяющей интервал, где отклик от цели превышает плавающий порог

$$E(n_x) = \begin{cases} 1, & D(n_x) > D_{\text{por}}(n_x) \\ 0, & D(n_x) \leq D_{\text{por}}(n_x) \end{cases} \quad (6.77)$$

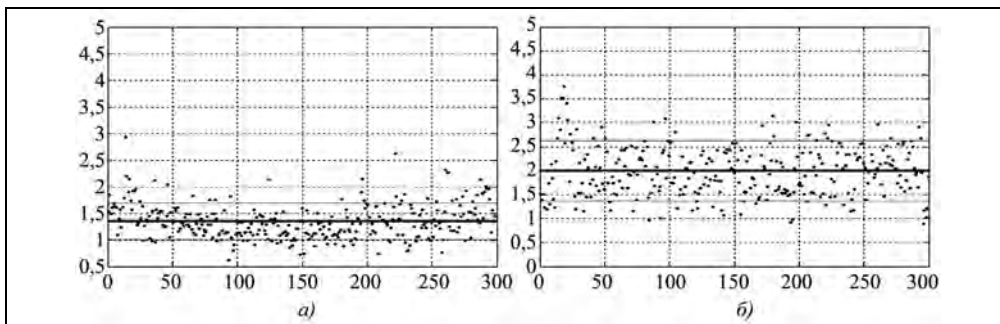


Вид масок показан на рис. 6.55. Изображена правая часть кадра, показанного на рис. 6.53, *a* с более разнообразным ландшафтом, включая автомобильный мост. Дано сравнение четырех вариантов обработки: при высоком уровне коэффициента порога  $K_{\text{пор}_g}=4$  для отсеивания откликов от слабых целей, сфокусированное РЛИ (*a*) и расфокусированное РЛИ с  $m_{\text{df}}=6$  (*б*), а также при низком уровне порога  $K_{\text{пор}_g}=0,5$  – сфокусированное (*в*) и расфокусированное (*г*) РЛИ;



**Рис. 6.55.** Матрицы масок  $E(n_x)$  на местах откликов для автофокусировки: коэффициент порога  $K_{\text{пор}_g}=4$  (*a-б*),  $K_{\text{пор}_g}=0,5$  (*в-г*), сфокусированные РЛИ (*a, в*), расфокусировка с  $m_{\text{df}}=6$  (*б, г*); направление полета (азимут) – вверх

*б*) оценивают ширину отклика как отношение ширины  $E(n_x)$  к ширине порогового окна и определяют среднюю ширину и СКО откликов по каналам дальности. При большом СКО, в принципе, можно отбросить каналы дальностей с большими отклонениями размеров отклика от среднего. Показанное на рис. 6.56 распределение ширины отклика (в пикселях РЛИ) в каналах дальности для сфокусированного и расфокусированного РЛИ показывает возможности такой отбраковки отметок от целей.



**Рис. 6.56.** Распределение ширины отклика (в пикселях РЛИ) в каналах дальности для сфокусированного РЛИ (*a*) и при расфокусировке с  $m_{\text{df}}=6$  (*б*):

жирной линией показано среднее значение ширины отклика, тонкими линиями – уровни  $\pm$ СКО относительно среднего значения; по оси абсцисс отложены азимутальные отсчеты

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Моделирование алгоритма показало, что оптимальная величина коэффициента порога  $K_{\text{пор}_g} = 3 \dots 4$ . При этом число откликов для фокусировки составляет около 3 % от размерности матрицы. При расфокусировке с расширением отклика в два раза число откликов уменьшается до 2,5 %. При этом среднее число откликов в одном канале дальности – около 7. Если выбрать низкий постоянный порог  $K_{\text{пор}_g} = 0,5$ , число откликов возрастает до ~9 %, но возникает ошибка измерения длительности отклика порядка 40 %.

Достоинства рассмотренной процедуры поиска отсчетов для автофокусировки состоят в ее чувствительности к изменению ширины отклика от цели и возможности резкого повышения числа выделяемых импульсов. Проведенное исследование этой процедуры показало, что в отражениях от реальных объектов в РСА с пространственной разрешающей способностью около 1 м имеется достаточное число квазиточечных отражателей, пригодных для решения задачи автофокусировки путем применения любого из алгоритмов, использующих отклики от точечных целей.

### 6.10.8. Локальная автофокусировка РЛИ высокого разрешения

В ряде ситуаций применение методов автофокусировки имеет особенности. Как было отмечено выше, в космических РСА значение ЛЭС зависит от высоты рельефа. При этом для получения РЛИ высокого разрешения может сказаться отсутствие достаточной информации о рельефе местности, также может встретиться ситуация наложения РЛИ разных участков, обусловленная геометрией построения радиолокационного изображения. Так, при радиолокационной съемке в гористой местности на изображения объектов в ущельях могут накладываться изображения от крутых склонов, что, с одной стороны, создаст помехи для дешифрирования объектов, а с другой стороны, вызовет нарушение работы алгоритмов автофокусировки, использующих информацию о поправках к опорной функции синтеза РЛИ, усредненную по площади наблюдаемой сцены.

Особенности влияния рельефа местности на получение РЛИ показаны на рис. 6.57. Рассмотрены случаи искажений геометрии РЛИ при малых и больших углах падения радиоволн  $\gamma_i$  по сравнению с локальными уклонами  $\beta$  окружающей местности. При построении радиолокационного изображения происходит преобразование горизонтальной дальности и высоты в наклонную дальность

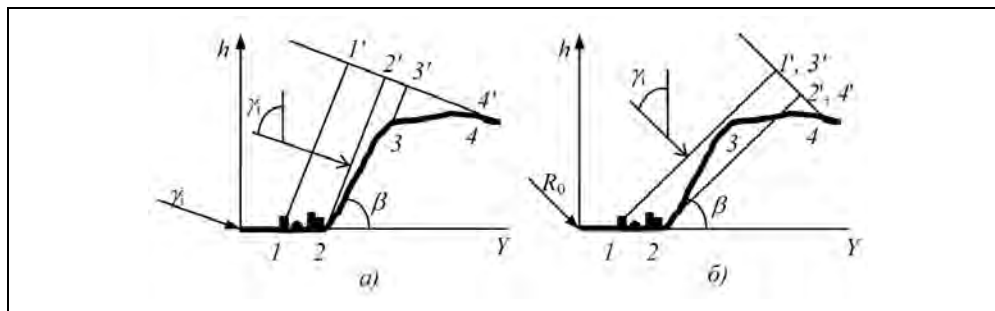
$$R = R_0 + Y \sin \gamma_i - h(Y) \cos \gamma_i, \quad (6.78)$$

где  $Y$  – поперечная дальность;  $R_0$  – наклонная дальность до начала участка с  $Y=0$ ;  $h(Y)$  – изменение высоты местности поперек трассы КА.

Появляются искажения масштаба  $\partial R / \partial Y$ .

Первая, обычная ситуация, типичная и для самолетных, и для космических РСА, показана на рис. 6.57,а. Вторая ситуации может, хотя и редко, встречаться при космическом землеобзоре, когда углы падения, превышают уклоны местности. Участки местности, находящиеся у подножия и на возвышенности, а также на горном склоне могут иметь одну и ту же наклонную дальность и их изображения мо-

гут накладываться (нарушается гомеоморфизм), как это показано на рис. 6.57,б (участки 1'-2' и 2'-4').



**Рис. 6.57.** Геометрия наблюдения гористой местности при малых (а) и больших (б) углах падения

Естественно, что работа алгоритмов автофокусировки в этой второй двузначной ситуации нарушается, а наложение фрагментов РЛИ друг на друга ухудшит дешифрируемость РЛИ. Вместе с тем, можно сформулировать стратегию формирования и отображения радиолокационных снимков местности с большими перепадами рельефа для их тематического дешифрирования. Можно рекомендовать построение рабочего места дешифровщика, с использованием в качестве исходного материала КРЛИ, синтез которого выполнен по параметрам баллистического обеспечения, и реализацией локальной фокусировки КРЛИ в процессе дешифрирования.

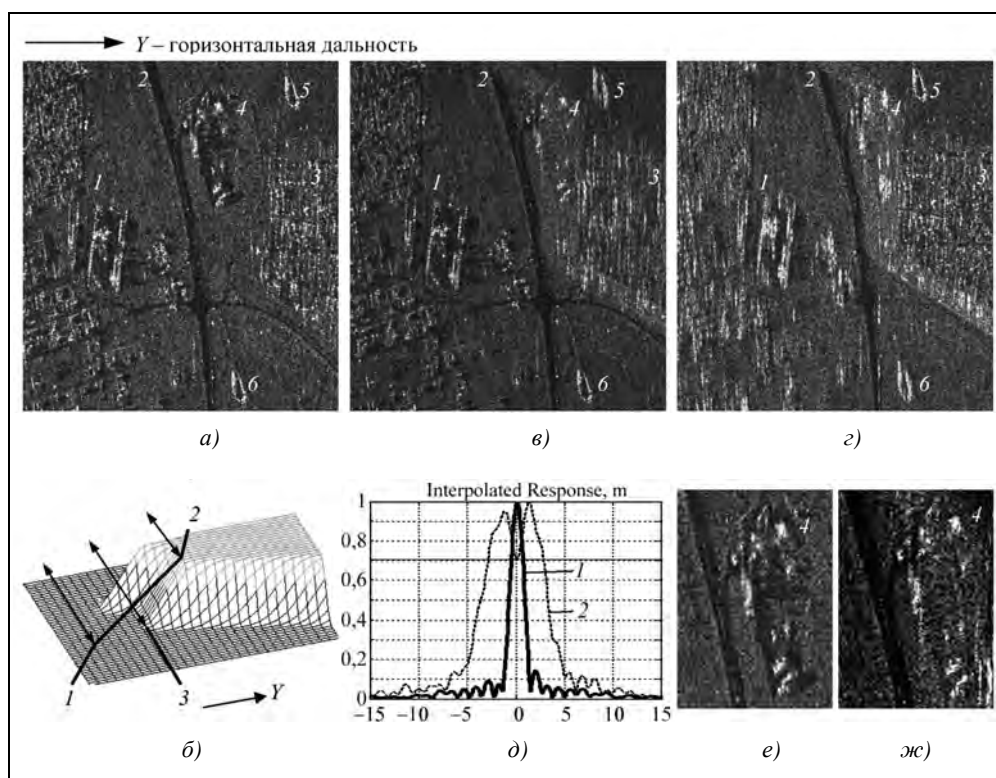
Исходя из такой концепции, для систем экстренного наблюдения (при мониторинге катастроф) целесообразно изменить классическую процедуру получения фокусированного РЛИ, требующую временных затрат. Синтез комплексных изображений выполняют непосредственно по баллистической информации, имеющейся на момент съемки. Не проводя автофокусировки, полученное изображение (первичное, не полностью скорректированное, некалиброванное) подают на рабочее место дешифровщика, который выделяет нужные фрагменты изображения для детального дешифрирования и реализует по ним локальную автофокусировку. Малый размер фрагмента позволяет сократить время итераций процедуры автофокусировки. Такое построение рабочего места является эффективным также и для наблюдения гористых районов.

Для ситуации, показанной на рис. 6.57,а, возможно использование цифровой карты рельефа с разделением кадра на набор фрагментов с перепадами высот, не ухудшающих разрешение, затем производится автофокусировка каждого фрагмента и составляется мозаика полного изображения. Для ситуации с наложением изображений участков местности с разными высотами (рис. 6.57,б) предложенное построение рабочего места позволит применить алгоритмы локального фокусирования.

Воспользовавшись тем, что на этих участках временные зависимости фазы различаются, можно снизить помехи от наложения изображений при их дешифрировании путем локальной фокусировки суммарного комплексного изображения. На

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

рис. 6.58 иллюстрируются результаты моделирования. В качестве исходной модели (а) взято полученное с помощью самолетного РСА ИМАРК [37\*, 185\*] комплексное изображение с азимутальным разрешением около 1 м. Изображение включает расположенные на равнине городскую застройку 1, автомагистраль 2, сельский поселок 3, усадьбу 4 и два близких по конфигурации инженерных сооружения 5 и 6.



**Рис. 6.58.** Моделирование фокусированного синтеза изображения с перепадами высот:

а – первичное РЛИ  $X$ -диапазона, полученное самолетным РСА; б – модель рельефа местности, включающая равнину (точка 1), горное плато (точка 2), зону наложения изображений (1–3); в, з – модель РЛИ космического РСА с фокусировкой по равнине (в) и по горному плато (з); д – импульсный отклик РЛИ по азимуту для фокусированной (1) и расфокусированной (2) частей РЛИ; е, ж – увеличенные фрагменты первичного РЛИ (е) и модели РЛИ (ж) в зоне наложений изображений

При моделировании использовался алгоритм автофокусировки PGA с модификацией, позволяющей оценивать поправку к фазе по множеству откликов в каждом из каналов дальности. Это позволило уменьшить размеры фрагмента КРЛИ при сохранении высокой точности фокусирования.

На рис. 6.58,б приведена карта рельефа модели местности с горным плато высотой 1000 м. Модели изображений для космического РСА  $S$ -диапазона волн приведены на рис. 6.58,в и з. Представлены **изображения с двумя вариантами фокусированной обработки**:

- с фокусированием по равнине (рис. 6.58,а), на котором резко отображается низменная часть ландшафта (объекты 1, 2, 4, 5), а верхняя часть (объекты 3, 6) размыта;
- с фокусированием по плато (рис. 6.58,б), где объекты на плато видны с высоким разрешением, а изображение объектов на равнине размыто.

Заметим, что помехи от расфокусированных составляющих на участках наложения изображений (усадьба 4 на рис. 6.58,а и б) хотя и снижают качество изображения, но возможность дешифрирования сохраняется.

Полученные результаты моделирования подтвердили эффективность применения алгоритма локального фокусирования PGA для получения РЛИ высокого разрешения малых фрагментов, необходимых для тематической обработки.

### **6.11. Особенности синтеза РЛИ в режимах скошенного и бистатического обзоров**

#### **Синтез РЛИ в скошенном режиме обзора**

Преимущества скошенного обзора кроме увеличения времени наблюдений и возможности получения изображений объектов под разными ракурсами заключаются в снижении уровня помех неоднозначности [416, 459]. Работа в скошенных режимах обзора приводит к появлению смещения доплеровской частоты сигнала и линейной миграции дальности. Методы компенсации доплеровского смещения аналогичны применяемым в прожекторном режиме, для которых, несмотря на малые углы скоса, доплеровская частота значительно превышает частоту повторения зондирующего сигнала. Для устранения линейной составляющей миграции дальности в РСА самолетного базирования с широкими углами наблюдения по азимуту рекомендовано применение преобразования Столта. Однако для космических РСА при узком азимутальном угле антенны РСА в большинстве случаев можно ограничиться модифицированными алгоритмами на основе алгоритма CSA [258]. Вместе с тем изменение фазы принимаемого сигнала между соседними зондированиями на несколько  $\pi$  может вызвать необходимость введения межпериодной интерполяции отчетов на повышенную виртуальную частоту повторения.

#### **Особенности бистатического зондирования**

Технические аспекты, связанные с получением радиолокационного изображения в многопозиционных системах, сводятся к рассмотрению бистатической пары активного облучающего устройства – передатчика и пассивного приемного устройства – приемника. Основные практические варианты бистатического зондирования с участием космического сегмента включают в себя космическую пару передатчик–приемник на разных орбитах (например, тандемы спутников), аэрокосмическую пару [254, 398], обычно: орбитальный передатчик и приемник, размещенный на самолете или БЛА, и наконец, вариант с подсветом с помощью передатчика, установленного на геостационарном спутнике и приемнике – на низкоорбитальном спутнике, самолете или БЛА (соответственно космическая или аэрокосмическая бистатическая система [329, 439\*, 507]).

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Особенности работы бистатических систем связаны с геометрией относительного движения, согласованием времени совместной работы, синхронизацией циклограмм облучения и приема сигналов, способами выделения зондирующего сигнала (прямой прием облучающего сигнала) на фоне паразитных отражений от подстилающей поверхности, компенсацией различия частот и фазы локальных опорных генераторов, миграцией дальности и доплеровским смещением зондирующего и отраженных сигналов [282, 303, 329, 392, 424, 425, 499, 510].

Возможны два варианта геометрии обзора в бистатических системах – согласная и оппозитная. Для согласования времени обзора в аэрокосмических системах возможно расширение луча антенны передатчика или управление лучом подсвета, как в прожекторном режиме съемки в моностатических РСА.

Наиболее простой случай бистатического зондирования – тандемы космических РСА на близких орбитах TanDEM-X, Radarsat-2/3 [276, 317, 330], для которых главная проблема – точное измерение базы между спутниками для снижения погрешностей интерферометрических измерений и построения карт рельефа местности.

При аэрокосмическом бистатическом зондировании приемник на самолете работает в квазинепрерывном режиме. Для параллельных траекторий движения спутника и самолета (что может не соблюдаться на практике) разрешающая способность по наклонной дальности определяется шириной спектра зондирующего сигнала, как в моностатических РСА, а вдоль линии пути она зависит от соотношения между скоростями и наклонными дальностями до цели от передатчика и приемника

$$\rho_X = \frac{\lambda}{T_{\text{synt}}} \left( \frac{V_{\text{tx}}}{R_{\text{tx}}} + \frac{V_{\text{rx}}}{R_{\text{rx}}} \right)^{-1}, \quad (6.79)$$

где  $T_{\text{synt}}$  – время синтеза;  $V_{\text{tx}}$  и  $V_{\text{rx}}$  – путевые скорости передатчика и приемника;  $R_{\text{tx}}$  и  $R_{\text{rx}}$  – наклонные дальности цели от передатчика и приемника.

Для моностатического обзора, когда параметры передатчика и приемника идентичны, имеем известную формулу для азимутального разрешения.

Разрешение поперек линии пути по горизонтальной дальности в случае согласных направлений обзора вычисляется через углы падения для падающей и отражающей волн

$$\rho_Y = \frac{c}{\Delta f} \frac{1}{|\sin \gamma_{\text{ti}} + \sin \gamma_{\text{ri}}|}, \quad (6.80)$$

где  $c$  – скорость света;  $\Delta f$  – полоса зондирующего сигнала;  $\gamma_{\text{ti}}$  и  $\gamma_{\text{ri}}$  – углы падения облучающей и отраженной волн.

Приведенная формула справедлива и для оппозитного бистатического обзора, при котором знак угла падения облучающей волны берется с минусом.

Принципиально для синтеза РЛИ пригодны те же алгоритмы, что и для моностатического обзора, но с учетом другого закона изменения фазы опорной функции, зависящего от геометрии взаимного движения. Применяют, например, алгоритм нелинейного ЛЧМ-масштабирования [426] или адаптированный для бистатического зондирования алгоритм «обратной проекции» (Backprojection, другое его

название – «когерентное накопление в выходном КРЛИ»), который позволяет устранить отклонения от прямолинейного движения при синтезе РЛИ высокого разрешения [254, 506].

### 6.12. Синтез РЛИ в видеоимпульсных РСА

В обычных узкополосных РСА формирование отклика по азимуту реализуется путем согласованной фильтрации сигнала (радиоголограммы), фазовая структура которого, вызванная изменением временной задержки принятого сигнала, определяется временным законом движения РЛС относительно наблюдаемой цели. В видеоимпульсных РСА (ВИРСА) информационным признаком является именно изменение временной задержки сигнала от цели по траектории полета. В связи с этим разрешающая способность радиолокационного изображения по азимуту получается благодаря наличию миграции дальности сигнала, принимаемого от конкретной цели в суммарном процессе, записанном в радиоголограмме при радиолокационной съемке заданного участка местности. Термин «радиоголограмма» сохраним и для ВИРСА.

Форма зондирующего импульса в ВИРСА имеет ряд особенностей, рассмотренных ниже. В первом приближении абстрагируемся от этих особенностей и рассмотрим упрощенную модель, в которой излучаемые и отраженные от точечной цели импульсы имеют форму, близкую к прямоугольной. Тогда, можно считать, что синтез РЛИ обеспечивается путем простого суммирования принятых сигналов по опорной функции («траекторному окну»), которая компенсирует изменение временного запаздывания сигналов вдоль трассы полета для точечной цели на траверсе. Азимутальное разрешение ВИРСА определяется реализуемым разрешением по наклонной дальности  $\rho_R$  и длиной синтезированной апертуры  $L_a$ . Идеализированная картина получения азимутального разрешения для прямоугольного зондирующего импульса представлена на рис. 6.59.

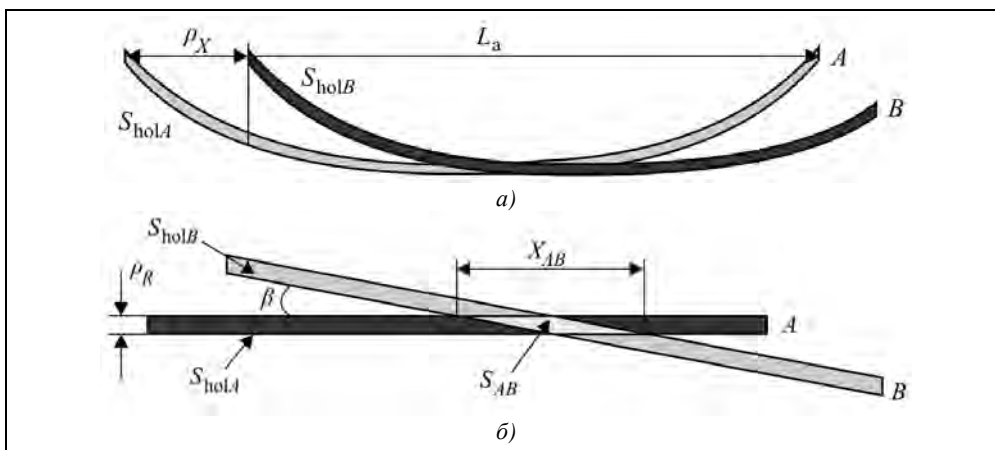


Рис. 6.59. Формирование азимутального разрешения в ВИРСА:

*a* – радиоголограммы двух целей, смещенных по азимуту; *б* – радиоголограммы целей, скорректированные по миграции дальности (времени задержки) для целей *A* и *B*

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

В результате обработки радиоголограммы цели  $A$  амплитуда на выходе будет пропорциональна площади следа (годографа) голограммы  $S_{\text{hoIA}} = \rho_R L_a$ . Годограф голограммы цели  $B$  будет смещен по азимуту на величину  $\rho_X$  и после компенсации миграции дальности окажется повернутым относительно опорной функции на угол

$$\beta = \text{arctg}(\rho_X / R_0), \quad (6.81)$$

где  $R_0$  – наклонная дальность на траверзе.

Радиоголограмма от цели  $B$ , будучи коррелирована с опорой, совпадающей с годографом цели  $A$ , даст на выходе амплитуду, пропорциональную общей площади параллелограмма

$$S_{AB} = \frac{\rho_R X_{AB}}{2} \approx \frac{\rho_R^2}{\text{tg}\beta} = \frac{\rho_R^2 R_0}{\rho_X} \text{ при } \beta > \text{arctg} \frac{\rho_R}{2L_a}. \quad (6.82)$$

Если, как обычно, принять, что интервал разрешения равен ширине реакции на уровне  $-3$  дБ ( $0,707$  от амплитуды), то из соотношения  $S_{AB} = 0,707 S_{\text{hoIA}}$  получаем известное для «узкополосных» РСА выражение, в котором длина волны заменена разрешением по наклонной дальности, деленным на квадратный корень из двух

$$\rho_X = \frac{R_0 \rho_R / \sqrt{2}}{2L_a}. \quad (6.83)$$

Кроме сигнала от цели  $A$  в окно опорной функции в каждом зондировании будут попадать сигналы от целей, наклонная дальность которых совпадает с наклонной дальностью окна в пределах ширины диаграммы направленности радиолокатора, для которой в маршрутном режиме съемки размер зоны облучения по азимуту определяет длину синтезированной апертуры  $L_a$ . При наблюдении местности с равномерной случайной отражающей поверхностью доля таких помеховых составляющих для этой упрощенной модели во много раз (как  $L_a / \rho_X$ ) превысит долю полезной составляющей от цели  $A$ .

Рассмотренная упрощенная модель обработки радиоголограммы ВИРСА исходит из некогерентного накопления сигналов в окне опорной функции, без учета реальной формы зондирующего импульса и корреляционных связей в отраженном сигнале. Поэтому из нее делается ошибочный вывод о снижении контраста ярких целей на окружающем фоне, а также невозможности обнаружения элементов фона с нулевым отражением (например, участков поверхности с поглощающим покрытием). Учет реальных условий зондирования приводит к классическому алгоритму согласованной фильтрации когерентных сигналов, в которых приведенная выше упрощенная модель обработки сигналов является элементом полного алгоритма синтеза видеоимпульсного РЛИ.

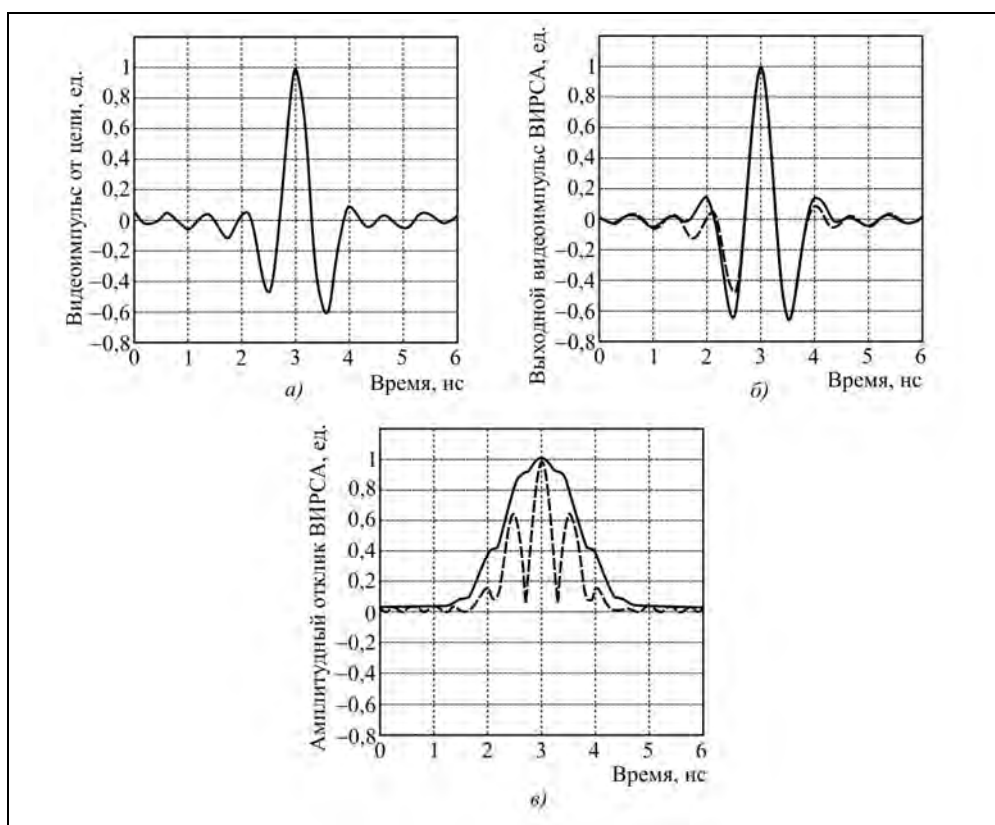
Учетом влияния формы зондирующего импульса в ВИРСА [6, 94, 228, 404, 455]. Видеоимпульс, излученный антенной ВИРСА в пространство, представляет собой сложное колебание, не имеющее постоянной составляющей. Это объясняется тем, что антенная система представляет собой полосовой фильтр со свойствами дифференцирующего звена. Излучаемое антенной поле является производной от возбуждающего тока. Постоянная составляющая отсутствует в распространяющемся электромагнит-



ном поле. При использовании в ВИРСА многоэлементной антенной системы – видеорешетки – ее коэффициент усиления пропорционален квадрату частоты, что также сказывается на форме принимаемого от целей сигнала (происходит подчеркивание высокочастотных компонент как при передаче, так и при приеме сигналов).

Форма сигналов на входе обработки зависит также от частотной характеристики приемника. Обычно, ширину полосы приемника ограничивают из соображений повышения отношения сигнал шум, а также с целью снижения частоты квантования принимаемого сигнала для уменьшения потока передаваемых данных на пункты обработки информации.

В результате моделирования преобразований сигналов в тракте ВИРСА, выполненного по методике, изложенной в гл. 10, получены представленные на рис. 6.60 модели радиолокационных откликов при наблюдении точечных целей. В ВИРСА использован диапазон частот 200...1400 МГц (примерно три октавы), включающий в себя три узкополосных диапазона (*VHF*, *P* и *L*), применяемых в самолетных РСА (например, в бортовом комплексе ИМАРК [37\*, 185\*]).



**Рис. 6.60.** Форма видеоимпульсов при наблюдении точечной цели:

*a* – принятый сигнал на выходе приемника; *б* – выходной видеоимпульс ВИРСА, пунктиром показан принятый импульс; *в* – амплитудные отклики, модуль видеоимпульса (пунктир) и сглаженная огибающая (жирная линия)

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

Вид сигнала от точечной цели на выходе приемника (строка радиоголограммы) до обработки сигнала показана на рис. 6.60,а. Для обработки такого сигнала с помощью рассмотренной выше упрощенной модели опорная функция должна включать несколько (например, три) каналов суммирования с разными знаками.

В итоге приходим к вычислению свертки принятого по дальности сигнала с опорной функцией, которая представляет собой отклик от точечной цели с обратным отсчетом времени (это соответствует комплексно сопряженному спектру опорной функции в алгоритме быстрой свертки). Вид выходного импульса ВИРСА в строке дальности после согласованной фильтрации показан на рис. 6.60,б жирной линией. Длительность пика видеоимпульса по уровню минус 3 дБ составляет 0,27 нс.

Форма зондирующего импульса без постоянной составляющей приводит к тому, что сумма помеховых составляющих от целей, смещенных по азимуту, в среднем равна нулю. Для определения вклада флуктуационных составляющих помех следует оценить интегральный уровень боковых лепестков двумерного импульсного отклика ВИРСА.

Для этого учтем, что после дискретизации принятого непрерывного видеосигнала его запись в цифровой форме может рассматриваться как комплексный процесс с нулевой мнимой частью:

$$u(t_n) = U_m(t_n)(1 + j0). \quad (6.84)$$

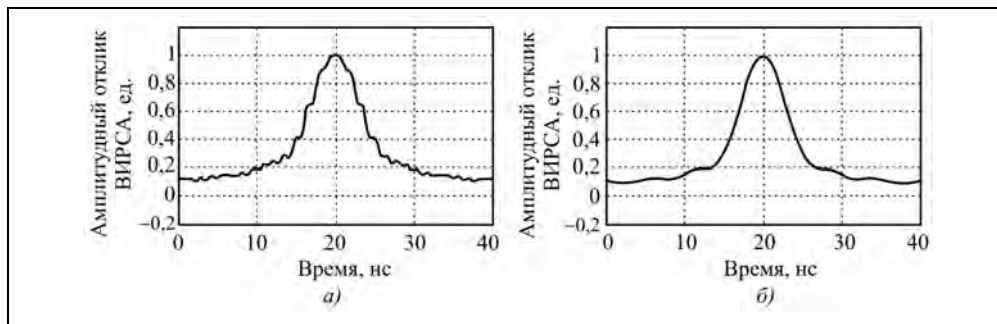
Этой комплексной амплитудой можно виртуально промодулировать колебание сколь угодно высокой несущей частоты  $e^{j2\pi f_0 t_n}$  и получить дискретное представление комплексного сигнала, как в узкополосных процессах. К такому сигналу применим весь математический аппарат анализа *комплексных процессов* и *все алгоритмы синтеза КРЛИ*, рассмотренные выше в настоящей главе. Выходные информационные продукты радиолокационного зондирования с применением ВИСАР могут быть представлены в виде видеоизображений  $U(R, X) = \text{Re}(\dot{i}_{\text{out}}(R, X))$ , амплитудных  $A(R, X) = |\dot{i}_{\text{out}}(R, X)|$  или энергетических РЛИ  $E(R, X) = |\dot{i}_{\text{out}}(R, X)|^2$ , а также РЛИ с некогерентным накоплением наблюдений.

На рис. 6.60,в приведены амплитудные отклики от точечной цели в форме модуля видеоимпульса (пунктир) и сглаженной огибающей (жирная линия). Длительность амплитудного отклика составляет 1,14 нс, разрешение по наклонной дальности 17 см.

Поскольку процедуры спектрального анализа и суммирования линейны, то весь частотный диапазон спектра принятого сигнала можно разбить на поддиапазоны и выполнять в них независимый синтез парциальных (спектрозональных) КРЛИ. В случае необходимости при синтезе парциальных КРЛИ можно применить автофокусировку для устранения искажений (например, коррекцию ионосферных нестабильностей в *VHF*-части спектра). Полученные парциальные КРЛИ с примыкающими спектрами суммируют на выходе для получения видеоимпульсного РЛИ.

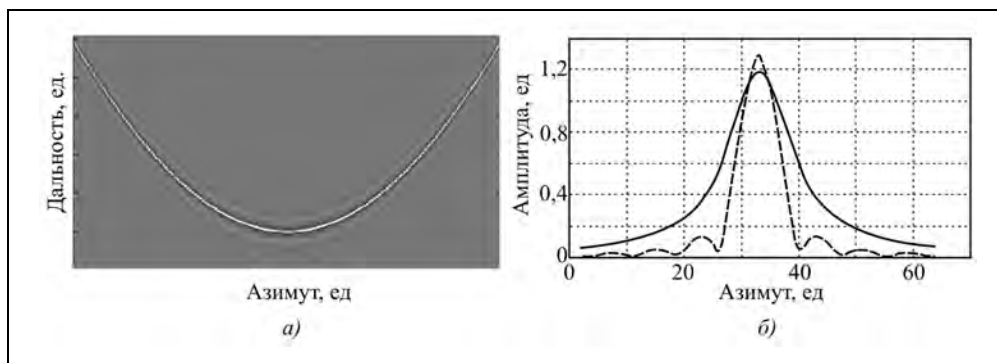
### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Спектрозональные КРЛИ и РЛИ, аналогичные РЛИ узкополосных РСА, но с лучшим пространственным разрешением, можно использовать для комплексного дешифрирования. На рис. 6.61 показаны амплитудные спектрозональные отклики от точечной цели в *VHF*- и *L*-диапазонах волн (частоты 200...400 и 1100...1300 МГц). Разрешающая способность по дальности таких спектрозональных РЛИ при ширине отклика 5,2 нс составляет 80 см, что значительно лучше, чем у традиционных узкополосных РСА, работающих в выделенных Регламентом радиосвязи частотных диапазонах с ограничениями по ширине полосы частот.



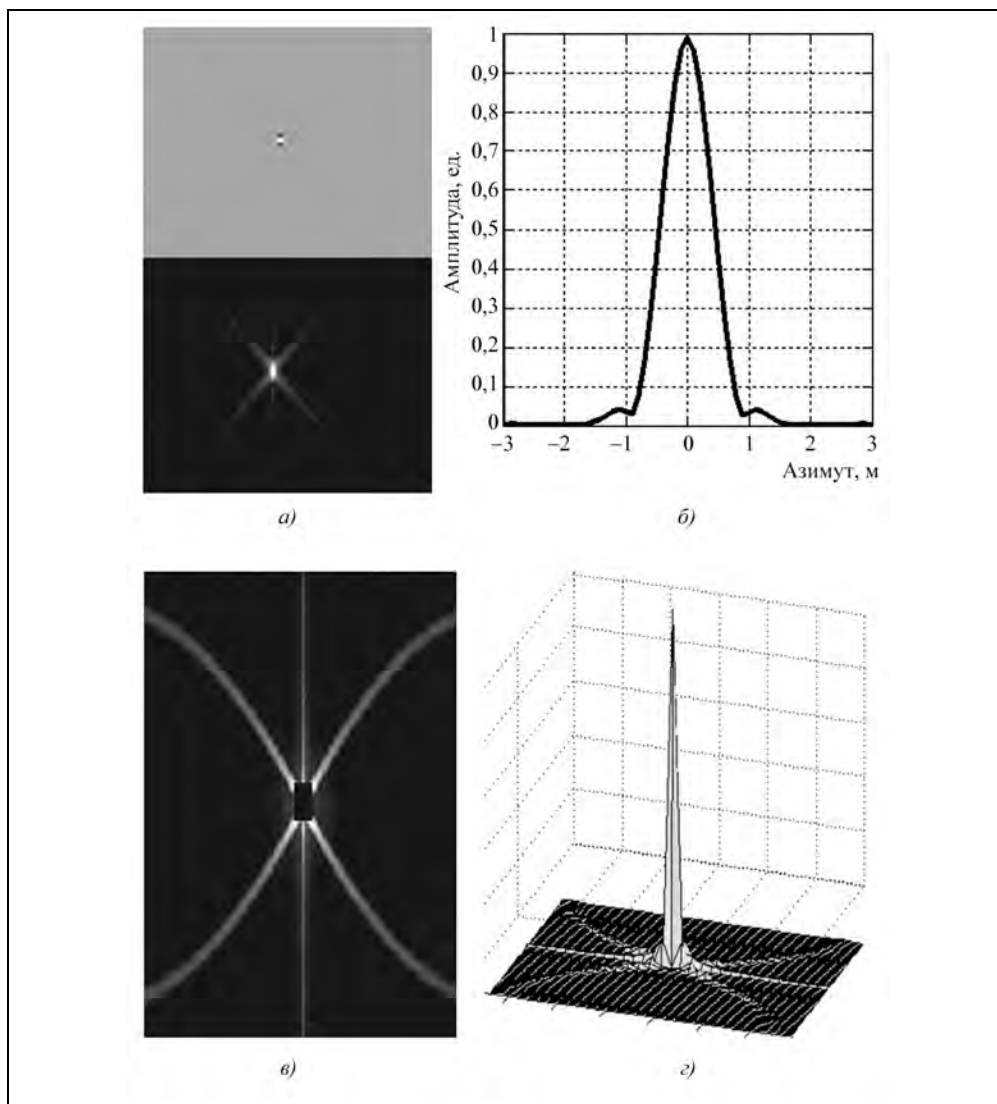
**Рис. 6.61.** Форма амплитудных спектрозональных откликов при наблюдении точечной цели: *a* – в *L*-диапазоне волн; *б* – в *VHF*-диапазоне волн (полоса сигнала в парциальной зоне 200 МГц)

Вид видеоимпульсной радиоголограммы от точечной цели в ВИРСА приведен на рис. 6.62. Там же показана ее амплитудная характеристика вдоль траектории полета, определяемая формой ДНА. В случае ВИРСА форма ДНА имеет расширенный пьедестал, обусловленный низкочастотными компонентами зондирующего сигнала. Для сравнения на рисунке пунктиром показана форма ДНА узкополосного РСА, имеющая вид  $\text{sinc}^2$ .



**Рис. 6.62.** Форма видеоимпульсной радиоголограммы (*a*) и ее амплитудная характеристика, определяемая формой азимутальной ДНА (*б*) (--- – форма азимутальной ДНА для узкополосного сигнала  $\lambda=23$  см)

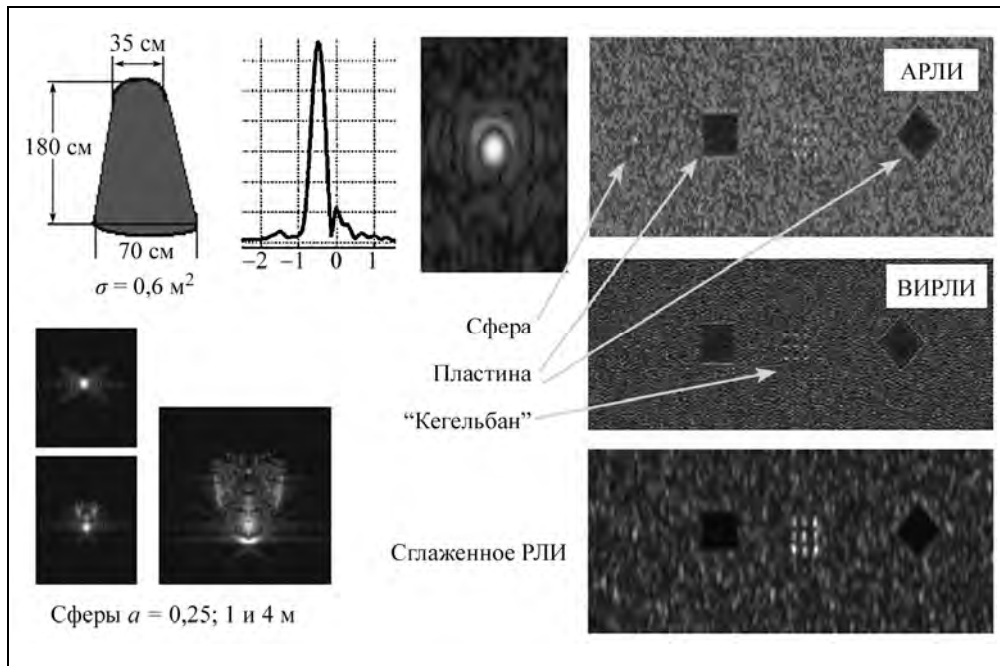
На рис. 6.63 показаны двумерные отклики от точечной цели – видеоимпульсный и амплитудный, сечение амплитудного отклика по азимуту, а также характер боковых лепестков двумерного амплитудного импульсного отклика (область главного лепестка подавлена) и рельефное отображение амплитудного импульсного отклика ВИРСА. Интегральный уровень боковых лепестков отклика – около  $-23$  дБ близок к реализуемому в узкополосных РСА.



**Рис. 6.63.** Вид откликов от точечной цели в модели ВИРСА:

*a* – видеоимпульсный отклик (вверху) и амплитудный отклик (внизу); *б* – сечение амплитудного отклика по азимуту; *в* – боковые лепестки амплитудного отклика (центральный пик подавлен); *г* – рельефное отображение амплитудного импульсного отклика ВИРСА

На рис. 6.64 приведены результаты моделирования РЛИ в ВИРСА при наблюдении группы объектов на шероховатой поверхности [427\*]. В качестве одного из объектов сравнения взята комбинация сферы с конусом, имеющая размеры человеческой фигуры.



**Рис. 6.64.** РЛИ моделей групповых объектов:

*a–в* – «сфера–конус», общий вид (*a*), сечение отклика по азимуту (*б*), двумерный отклик (*в*); *г* – сферы разного радиуса *a*; *д–ж* – объекты на шероховатой поверхности, амплитудное (*д*), видеоимпульсное (*е*) и сглаженное амплитудное (*ж*) РЛИ

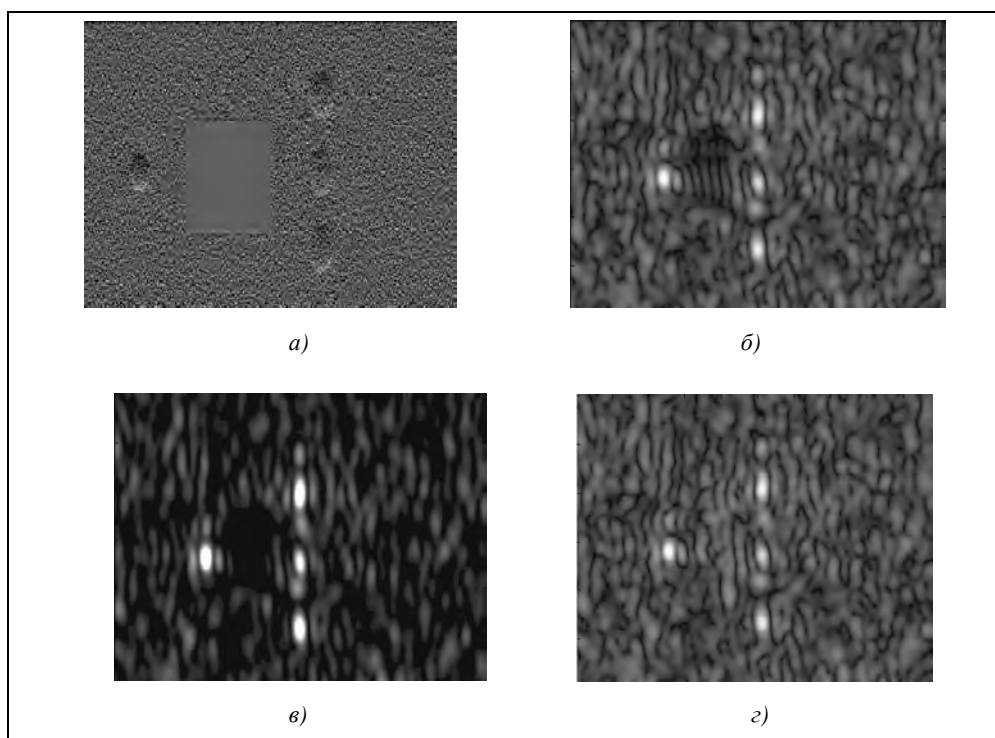
В заключение этого раздела еще раз остановимся на различии приближенного подхода к синтезу изображения в ВИРСА (аналог некогерентного накопления) и реального процесса когерентного суммирования откликов от наблюдаемой поверхности. Сначала рассмотрим сцену из одной строки по горизонтальной дальности. В элементе разрешения ВИРСА по дальности будут суммироваться сигналы от группы элементарных отражателей на земной поверхности (для использованной цифровой модели отражающей поверхности – в узлах сетки). Для гладкой поверхности соотношение задержек принятых сигналов таково, что суммарный сигнал равен нулю (зеркальное отражение в сторону от РЛС). Для неровной поверхности наклонные дальности отражателей (и задержки сигналов), поднятых над горизонтальной поверхностью, уменьшаются, и сигналы от них могут синфазно (при определенных условиях) суммироваться с сигналами от других ближе расположенных отражателей. Эти эффекты для узкополосных РСА рассмотрены в гл. 2. Таким образом, при появлении положительного градиента поля уровня поверхности проис-

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

ходит «сгущение» элементарных отметок, а при отрицательном градиенте – их «разрежение». В результате появляется амплитудная модуляция сигнала, принятого радиолокатором от неровной поверхности.

Аналогичный механизм действует и при суммировании сигналов в каждом элементе разрешения ВИРСА, когда сцена состоит не из одной строки дальности, а представляет кадр, представленный на рис. 6.65,а. Уровень помеховых составляющих определяется интегральным уровнем боковых лепестков импульсного отклика ВИРСА (см. рис. 6.63,в,г).

Результаты моделирования РЛИ применительно к рассматриваемой сцене представлены на рис. 6.65,б и в. Для сравнения на рис. 6.65,г дано РЛИ сцены без гладкой площадки. Показанные примеры свидетельствуют об эффективности представления выходной информации ВИРСА в виде сглаженного амплитудного РЛИ для обнаружения контрастных объектов (с повышенной или пониженной яркостью по отношению к окружающему фону). После обнаружения объектов по амплитудному РЛИ их детальное дешифрирование и распознавание проводится по видеоимпульсным РЛИ.



**Рис. 6.65.** Модель РЛИ неровной поверхности с объектами (слева направо) – сфера, гладкая площадка, три объекта «сфера–конус» по дальности:  
а – интенсивность отражения от неровностей; б – амплитудное РЛИ без сглаживания;  
в – сглаженное амплитудное РЛИ; г – амплитудное РЛИ сцены без гладкой площадки

Приведенные модели изображений, получаемых с помощью ВИРСА, свидетельствуют о том, что при сверхширокополосном зондировании сохраняются все механизмы рассеяния с поправкой на соотношения длины волны к масштабам неоднородностей облучаемой поверхности. Качественные отличия в изображениях разных объектов в видеоимпульсных РСА и в обычных узкополосных РСА являются носителями дополнительной информации об объектах. В первую очередь это связано с частотной зависимостью ЭПР объекта в диапазоне длин волн от сантиметров до метров, содержащихся в видеоимпульсе. Так, например, при отражении от сферы суммируются эффекты, вызванные разными механизмами рассеяния, включающими оптическую, резонансную и релеевскую области.

Для синтеза изображения в ВИРСА в связи с большими значениями миграции дальностей и их изменениями в пределах кадра наиболее адекватным алгоритмом представляется алгоритм обратной проекции (Backprojection). Его недостаток – высокие вычислительные затраты. Для их снижения целесообразно адаптировать алгоритмы, используемые для узкополосных РСА, к конкретным параметрам принимаемых сигналов в ВИРСА.

### **6.13. Современные тенденции создания программно-аппаратных комплексов для синтеза радиолокационных изображений**

Современные РСА космического базирования проектируются как многорежимные, многофункциональные информационные датчики, реализующие близкие к предельно достижимым техническим характеристикам (пространственное и радиометрическое разрешение, чувствительность, полоса обзора и полосы съемки). В аппаратуре широко используются секционированные активные фазированные антенные решетки, позволяющие осуществить многоканальное поляриметрическое зондирование, возможность индикации движущихся целей и использования специальных режимов (двойного приема, режима Скансар с высоким разрешением), а также интерферометрических режимов с применением гибкого цифрового управления формой ДНА, сканированием лучей по азимуту и углу места, выбором параметров зондирующих сигналов в режимах работы РСА.

Существует тенденция создания универсального вычислительного комплекса для обработки радиолокационных данных, который можно использовать в распределенной системе станций приема и обработки информации космических РСА. Такой вычислительный комплекс, названный 3dSAR разработан фирмой Vexcel Corporation, США [316]. Он включает в себя процессор SKY «нулевого уровня», обеспечивающий автоматическое определение источника данных, бит-коррекцию ошибок принимаемой информации, быстрый просмотр и оценку качества данных, преобразование времени к Международной шкале UTS, привязку данных к географическим координатам, а также оригинальный измеритель положения доплеровского центроида с повышенной точностью. Процессор QuickLook нулевого уровня выполняет синтез РЛИ низкого разрешения, по которому можно оценить полосу съемки и длину снятого маршрута.

## **Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА**

Обработка информации уровня 1 реализуется в процессоре маршрутного режима FOCUS, использующего алгоритм синтеза «Дальность – доплеровская частота», а также в процессоре SWATH для режима Скансар, где применяется алгоритм Z-преобразования. Специальный процессор OrthoSAR выполняет коррекцию и точные преобразования РЛИ в картографические проекции изображений уровня 2.

При разработке вычислительного комплекса 3dSAR применительно к обработке информации РСА PALSAR был учтен опыт создания и эксплуатации многочисленных станций приема и обработки космической информации, размещенных по территории земного шара. Комплекс позволяет обрабатывать данные с ранее запущенных и находящихся в эксплуатации космических РСА ERS-1/2, Radarsat-1.

Процессор SKY преобразует данные, полученные по радиоканалу от бортового локатора, в «компьютерный» стандарт CEOS нулевого уровня. Архивирование данных возможно также в исходном формате радиоголограммы STF (Sky Telemetry Format) в виде двух (I/Q – cos/sin) сжатых на борту составляющих.

Процессор FOCUS использует входные данные нулевого уровня в форматах CEOS или STF и после синтеза выдает данные в формате CEOS первого уровня: SLC (single look complex) – КРЛИ, одно наблюдение или протектированные продукты. SWATH Скансар процессор, предназначенный для обработки данных Radarsat-1 легко адаптируется для информации РСА ASAR KA Envisat, РСА PALSAR KA ALOS. Процессор OrthoSAR преобразует РЛИ в картографические проекции UTM, может автоматически работать в режиме геокодирования или в автоматизированном режиме проводить прецизионную коррекцию РЛИ на основе цифровых карт рельефа или корректировать РЛИ по опорным точкам, которые выбираются оператором.

Примером построения многорежимного процессора синтеза РЛИ является универсальный процессор, предназначенный для обработки сигналов космического РСА TerraSAR-X в составе наземного сегмента Германского Космического Центра DLR [264–266, 464]. Конфигурация процессора и гибкое управление параметрами позволяют вести синтез изображения в маршрутном, прожекторном режимах, в режиме Скансар, поляриметрических режимах работы при разных характеристиках лучей антенны, в режиме двойного приема и интерферометрии вдоль линии пути.

Наземный сегмент центра обеспечивает управление спутником, прием и архивирование радиолокационной информации, ее обработку и распределение потребителям. Главной составной частью наземного сегмента является многорежимный РСА процессор TMSP. Его архитектура и программное обеспечение (ПО) предусматривают систематический анализ всех получаемых радиоголограмм, их архивирование и синтез РЛИ со средним разрешением, необходимым для каталогизации и поиска материалов радиолокационной съемки. Процессор позволяет по заявкам потребителей реализовать высокоточный синтез КРЛИ с сохранением фазы, а также получение РЛИ с некогерентной обработкой и геореференцированных РЛИ. При проектировании процессора была предусмотрена задача валидации и тестирования ПО. Алгоритмы синтеза РЛИ, реализованные в ПО процессора, основаны на применении алгоритмов ЛЧМ-масштабирования и масштабирования по азимуту, гармонического анализа и субапертурной обработки. Структурная схема заложенных в ПО алгоритмов синтеза РЛИ рассмотрена в разделе 6.8.



Принятая концепция реализации унифицированного ПО с соответствующей адаптацией входящих в него модулей для синтеза РЛИ во всех режимах работы позволила выполнить отладку, тестирование, документирование и валидацию ПО один раз, что обеспечило когерентность получаемых данных во всех режимах и снизило затраты на разработку программного обеспечения по сравнению с вариантом трех специализированных процессоров, предназначенных для каждого из режимов работы.

Унификация структуры процессора имеет преимущества сквозной калибровки РЛИ, в частности, при формировании мозаики снимков мокрого леса (со стабильным рассеянием), снятых в разных режимах работы РСА.

Рассмотрим основные идеи и технические решения, заложенные в процессор обработки информации, получаемой с РСА TerraSAR-X, как наиболее соответствующие современному уровню развития средств радиолокационного наблюдения космического базирования гражданского назначения (что не противоречит возможности их двойного применения).

Процессор обеспечивает получение РЛИ в широком наборе рабочих режимов – маршрутный, прожекторный и Скансар с различными комбинациями поляризации. Предусмотрены разнообразные варианты выходных информационных продуктов от КРЛИ с одним наблюдением (SLC – single look complex) до РЛИ с большим числом наблюдений (multilook), в том числе с улучшенным пространственным (spatially enhanced) или радиометрическим (radiometrically enhanced) разрешением в различных геометрических (картографических) проекциях. Возможно использование гибридного алгоритма фокусирования для получения КРЛИ в координатах наклонная дальность – азимут с сохранением фазовой информации (SSC – single look slant range complex), полученных в любом из режимов (маршрутный, прожекторный, Скансар). Во всех выходных информационных продуктах азимутальная координата соответствует нулю доплеровской частоты.

Реализация режимов синтеза первичного КРЛИ согласно структурной схеме (рис. 6.19) имеет ряд особенностей. В маршрутном режиме кадр синтеза КРЛИ включает несколько апертур с наложением изображений каждого кадра на предыдущий, по крайней мере на одну апертуру. Размеры кадра ограничены изменением положения доплеровского центроида и параметров опорной функции, а также аппаратными ограничениями процессора.

В прожекторном режиме используют разделение принятого сигнала на субапертуры, обеспечивающие азимутальную однозначность сигнала. В связи с тем, что в приемопередающих модулях АФАР применены фазовращатели с малой разрядностью, компенсация ошибок обеспечивается соответствующим выбором шага дискретизации азимутального положения луча [408]. Величина шага углов скоса лучей ДНА учитывалась при выборе длины субапертур синтеза в кадре обработки, в который, как и в режиме Скансар, перед процедурой азимутального БПФ вставляют дополнительные нулевые отсчеты (zero padding) во избежание появления неоднозначности.

## Глава 6. Алгоритмы синтеза радиолокационных изображений в космических РСА

В маршрутном режиме перед сжатием по азимуту в координатах дальность – доплеровская частота выполняются фильтрацию по частоте, сдвиг азимутальных отсчетов для устранения скаса и многозначности. Этапы обработки совпадают с реализованными в процессоре BSAR, который использовался для синтеза и интерферометрической обработки данных в канале X-SAR в составе PCA SRTM/X-SAR [266].

Последний этап синтеза РЛИ в маршрутном режиме включает в себя умножение азимутального спектра сигнала на спектральную опорную функцию, зависящую от наклонной дальности, и ОБПФ. В прожекторном режиме в модулях коррекции миграции дальности выполняются масштабирование сигналов по дальности и доплеровской частоте, что обеспечивает постоянство опорной функции по всему кадру съемки.

При синтезе РЛИ используют амплитудное взвешивание спектров сигнала с использованием окна Хемминга

$$W(f) = \alpha + (1 - \alpha) \cos(2\pi f/B) \text{rect}(f/B), \quad (6.85)$$

где задавалось значение  $\alpha=0,75$ , обеспечивающее уровень боковых лепестков не более  $-21,4$  дБ и интегральный уровень  $-16$  дБ. По результатам эксплуатации РСА было установлено, что качество РЛИ значительно улучшается при компромиссном значении  $\alpha = 0,6$  с уровнями боковых лепестков  $-32,6$  дБ и  $-19,5$  дБ при ухудшении пространственного разрешения всего на 18 % [265].

Входящий в структурную схему (см. рис. 6.19) программный модуль предварительной обработки входной информации обеспечивает восстановление формата сигналов после сжатия потока данных на борту КА, а также коррекцию аппаратурных искажений, вызванных температурными воздействиями и другими дестабилизирующими факторами, выявленными в процессе эксплуатации РСА на орбите.

Архитектура вычислительного комплекса построена по модульному принципу с распараллеливанием потоков обработки данных. Программирование в основном ведется на языке высокого уровня ADA, что облегчает и удешевляет отладку ПО. Предусмотрено гибкое управление ресурсами вычислительного комплекса, позволяющего выполнять все операции синтеза РЛИ с использованием высокопроизводительных компьютеров широкого применения.

Особое внимание должно уделяться обеспечению автономности программных модулей с возможностью выполнения их на других процессорах и в другое время. Для этого обрамление модуля должно включать все необходимые входные и выходные данные, а также сопровождающую и командную информацию. Дополнительные объемы вычислительных ресурсов, требуемые для такого построения программного обеспечения, вполне оправданы.

Рассмотренные в гл. 6 алгоритмы синтеза радиолокационного изображения обеспечивают получение комплексных, амплитудных или энергетических РЛИ (а для ВИРСА еще и видеоимпульсных РЛИ) с одним наблюдением. Такие изображения имеют значительную зернистость, вызванную спекл-шумом и поэтому низкое радиометрическое разрешение. Для улучшения изобразительных свойств (и де-

### ***Радиолокационные системы землеобзора космического базирования***

---

шифруемости) РЛИ используют последетекторную обработку – некогерентное накопление. Необходимость применения некогерентного накопления относится, в частности, к получаемым материалам со средним пространственным разрешением, которые помещают в каталоги для общего ознакомления с доступными материалами радиолокационной съемки.

Вопросы последетекторной обработки РЛИ, их регистрации, отображения и зрительного восприятия рассматриваются в гл. 7.

---

## Глава 7

# ОБРАБОТКА И РЕГИСТРАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

### 7.1. Методы фильтрации спекл-шума на РЛИ

#### 7.1.1. Задачи некогерентной обработки РЛИ

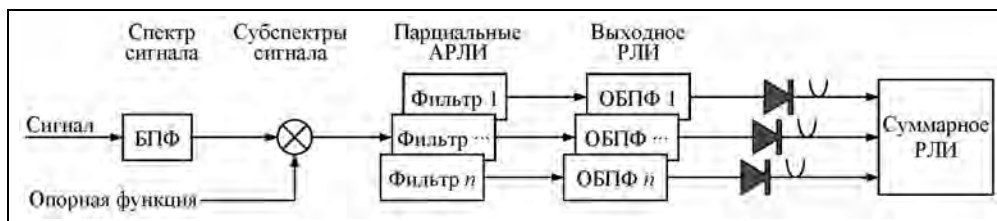
Специфической особенностью радиолокационных сигналов, отраженных от разного типа объектов при облучении узкополосным зондирующим СВЧ-импульсом, является наличие флуктуаций (спекл-шума), которые вызваны интерференцией элементарных отражателей, образующих объект. Принципиальным в образовании спекл-шума является соотношение размеров объекта и размера элемента разрешения изображения, формируемого при когерентной обработке сигнала. Для многих искусственных объектов, например, самолетов, ракет, кораблей радиолокационное изображение представляет собой набор ярких отметок от зеркальных точек (доминантных отражателей) со стабильной ЭПР при изменениях ракурса наблюдения. При использовании широкополосных (или сверхширокополосных) сигналов происходит разбиение группового объекта на элементы, взаимное положение которых за время синтеза может меняться под влиянием движения или затенения. Это приводит к нарушению когерентности траекторного сигнала, ухудшению пространственного разрешения РЛИ и возрастанию флуктуаций.

Наличие спекл-шума приводит к ухудшению дешифрируемости РЛИ, радиометрического разрешения и точности измерения компонентов радиолокационного портрета объекта, а также к повышению требований к каналу передачи данных и средствам отображения информации. Основным методом снижения спекл-шума является фильтрация (линейная, адаптивная и комбинированные методы) формируемого в результате синтеза амплитудного РЛИ (АРЛИ) или яркостного РЛИ – по энергии (ЭРЛИ), соответствующего квадрату амплитуды. Главная процедура такой фильтрации – некогерентное накопление или усреднение независимых наблюдений по площади выбранного окна на РЛИ.

Исторически сложилось, что космические РСА первого поколения имели разрешение по горизонтальной дальности около  $\rho_\gamma \approx 30$  м, более грубое, чем предельное разрешение  $\rho_\chi = D_{\text{хant}} / 2 \approx 5$  м, обусловленное горизонтальным размером используемых антенн ( $D_{\text{хant}} \approx 10$  м). Для синтеза РЛИ применяли оптические устройства обработки сигналов с выбором апертуры синтеза так, чтобы иметь одинаковое разрешение по обеим координатам. Имеющийся запас длительности сигнала использовали для некогерентного накопления (4 наблюдения).

Такой метод, при котором в одном элементе разрешения синтезированной ДНА усреднялись РЛИ, полученные на разных доплеровских частотах (внутриэле-

ментное некогерентное накопление), получил в зарубежной литературе название «Multilook». При цифровом синтезе РЛИ реализация внутриэлементного накопления обеспечивается путем разделения сигнала на субапертуры, когерентной обработки (синтез парциальных КРЛИ, полученных на разных доплеровских частотах с разными локальными углами скоса), детектирования и последующего суммирования парциальных РЛИ. Вместо временного разделения сигнала можно применить разделение азимутального спектра доплеровских частот на субспектры с последующими их синтезом, детектированием и суммированием парциальных РЛИ. Такую же операцию некогерентного накопления можно выполнять и по дальности. На рис. 7.1 приведена структурная схема внутриэлементного некогерентного накопления. Принципиально число наблюдений не обязательно должно быть целым, например, при оптическом накоплении или при перекрывающихся субапертурах (субспектрах).



**Рис. 7.1.** Структурная схема внутриэлементного некогерентного накопления

Кроме рассмотренного варианта *внутриэлементного некогерентного накопления* возможен, и в ряде случаев более перспективен, вариант *межэлементного некогерентного накопления*, при котором сначала получают КРЛИ с высоким разрешением по обеим координатам, а затем после детектирования проводят усреднение по требуемому числу наблюдений. Хотя этот вариант требует повышенной производительности процессора синтеза РЛИ, но применительно к РСА высокого разрешения он имеет ряд преимуществ:

- 1) возможность адаптивного выбора размеров и конфигурации усредняющего окна для применения современных алгоритмов автоматической сегментации РЛИ, вейвлет-фильтрации, нейронной обработки, фрактального анализа;
- 2) возможность получения радиолокационных портретов малоразмерных объектов для распознавания и классификации после их обнаружения на сглаженном снимке;
- 3) архивация детальных РЛИ и КРЛИ для их последующего использования, включая интерферометрическую обработку снимков, снятых в разное время.

Метод межэлементного некогерентного накопления был, в частности, применен в устройстве оптического синтеза РЛИ в РСА «Меч-К» КА «Космос-1870». Первичное окно выбирали соответствующим азимутальному разрешению  $\sim 10$  м, а вторичную щель расширяли из расчета получения разрешения 30...50 м.

Структурная схема межэлементной некогерентной обработки приведена на рис. 7.2. Входной информацией является яркостное (реже амплитудное) РЛИ или комплексное РЛИ, после которого выполняется детектирование (как правило,

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

квадратичное). Фильтрация спекл-шума может включать в себя как линейные операции (сглаживание в окне), так и нелинейные (логарифмирование, оценка локальных параметров, адаптивная пороговая обработка и др.).

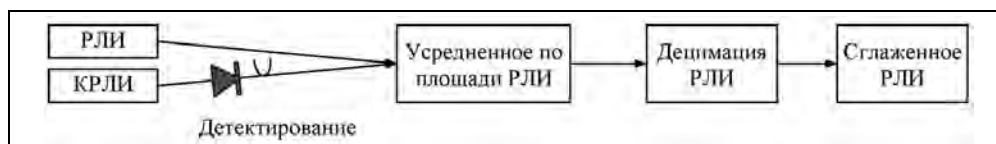


Рис. 7.2. Структурная схема межэлементного некогерентного накопления

Общей задаче подавления спекл-шума на РЛИ посвящено много работ [16, 22, 73]). Их можно разделить на следующие группы:

1) глобальные, предусматривающие воздействие на все РЛИ или основную ее часть. К ним, в частности, относятся алгоритмы суммирования (усреднения) независимых РЛИ с постоянными параметрами в пределах кадра;

2) локальные, основанные на оценке локальной статистики. К ним относятся методы, улучшающие дешифрируемость и изобразительные свойства РЛИ, но не сохраняющие измерительные свойства РЛИ. Такие методы используют для автоматизированной обработки, включающей визуальное дешифрирование при отображении РЛИ на дисплеях с компьютерной программной поддержкой. К этим методам относятся упомянутые выше методы адаптивной фильтрации – локальные адаптивные методы, сохраняющие измерительные свойства РЛИ, с возможностью использовать РЛИ и для автоматизированной, и для автоматической интерпретации информации, которая содержится в РЛИ (АРЛИ и КРЛИ);

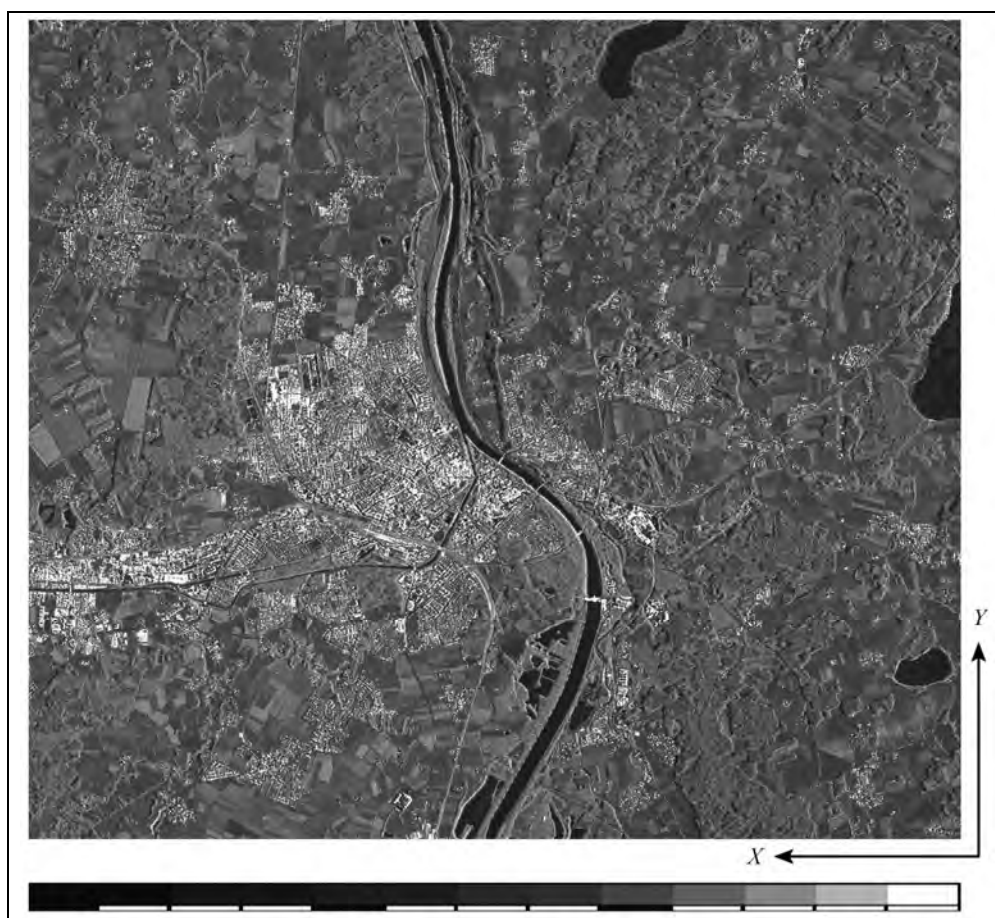
3) нелокальные способы фильтрации (non-local means), в которых на первом шаге выполняют локальную обработку в небольшом блоке (окне, обычно до  $9 \times 9$ ), анализируют статистику с обнаружением и определением характера аномалии (относительно однородной статистики). По этим данным ищут подобные образования в соседних блоках фрагмента РЛИ, а затем производят адаптивную фильтрацию совокупности однородных блоков.

Иллюстрацию работы алгоритмов некогерентного накопления, а также излагаемых положений, касающихся регистрации, отображения и обработки радиолокационной информации проведем на примерах РЛИ с использованием материалов космической съемки, проведенной с помощью РСА X-диапазона волн TerraSAR-X с высоким разрешением ( $\sim 1$  м), которые получены с разрешения фирмы Infoterra GmbH через веб-сайт <http://www.infoterra.de/tsx/freedata/start.php> [530]. Перечень использованных материалов, их описание и параметры приведены в табл. 7.1. Основными информационными продуктами, использованными для обработки, являются комплексные РЛИ высокого разрешения, полученные в прожекторном режиме. Обзорное РЛИ района съемки приведено на рис. 7.3. Приводимые РЛИ сопровождаются яркостным ступенчатым клином (от 1/64 до 1) с шагом 0,707, позволяющим оценить динамический диапазон отпечатка РЛИ. В зависимости от коэффициента контрастности печати этот шаг соответствует, например, 3 дБ при выводе на принтер амплитудного РЛИ и 1,5 дБ – при выводе энергетического РЛИ.

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

**Таблица 7.1. Перечень использованных материалов радиолокационной съемки РСА TerraSAR-X, Infoterra GmbH© [530]**

Район съемки	Дата съемки	Вид продукта	Имя файла
г. Розенхайм, Германия	27.01.2008	КРЛИ	IMAGE_HH_SRA_spot_072.cos
		АРЛИ	QL_HH_SRA_spot_072
Волга, район г. Волгограда, Россия	21.06.2007	АРЛИ	20070621_TSX_First_Image_Wolga_hig_res.tif
Пролив Гибралтар	10.08.2007	АРЛИ	20070810_GI_Gibraltar.jpg



**Рис. 7.3.** Обзорное РЛИ района г. Розенхайм, Германия (TerraSAR-X, Infoterra GmbH© [530]): внизу приведен яркостной ступенчатый клин с шагом 0,707

Поскольку во всех алгоритмах подавления спекл-шума используют элементы некогерентного накопления РЛИ, рассмотрим основные особенности и варианты выполнения этой процедуры.

### 7.1.2. Варианты и характеристики процедуры некогерентного накопления

При анализе методов некогерентного накопления исходят из предположения, что на КРЛИ спекл-шум, создаваемый однородной отражающей поверхностью, характеризуется действительной и мнимой составляющими, каждая из которых является нормальным гауссовым процессом с нулевым, средним и СКО, пропорциональным корню квадратному из  $\sigma^0$  – удельной эффективной поверхности рассеяния данного участка местности. Плотность вероятности распределения амплитуд подчиняется рэлеевскому закону. Плотность вероятности мощности (квадрата амплитуды) отраженного сигнала или ЭПР в элементе разрешения, образующая энергетическое РЛИ (ЭРЛИ), подчиняется экспоненциальному закону распределения, который является частным случаем  $\chi_k^2$ -распределения с  $k$  степенями свободы ( $k=2$ ).

При усреднении РЛИ с некоррелированными флуктуациями среднее суммы остается неизменным, а дисперсия уменьшается обратно пропорционально квадратному корню из числа наблюдений. Эти зависимости в виде формул приведены в разделе 3.5. По физической сущности распределение  $\chi^2$  (хи-квадрат) с  $k$  степенями свободы – это распределение суммы квадратов (ЭРЛИ)  $N=k/2$  независимых стандартных нормальных случайных величин.

Применительно к межэлементному некогерентному накоплению усреднение РЛИ проводят в окне размером  $N_Y \times N_X$ . **Математическая зависимость отсчетов выходного усредненного РЛИ** от входного имеет вид:

- при усреднении энергетического РЛИ с последующим преобразованием в амплитудное РЛИ

$$A_N(m, n) = \sqrt{\frac{1}{N_Y N_X} \sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} A^2(m+k, n+l)}; \quad (7.1)$$

- при усреднении по амплитуде

$$A_N(m, n) = \frac{1}{N_Y N_X} \sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} A(m+k, n+l). \quad (7.2)$$

В ряде специальных случаев (для интерферометрической обработки) усреднение по амплитуде реализуют путем усреднения отдельно действительной и мнимой составляющих

$$A_N(m, n) = \frac{1}{N_Y N_X} \left\{ \left( \sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} A(m+k, n+l) \cos \varphi(m+k, n+l) \right)^2 + \right.$$



$$+ \left\{ \sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} A(m+k, n+l) \sin \varphi(m+k, n+l) \right\}^2 \Bigg\}^{1/2}. \quad (7.3)$$

Реальное число наблюдений в выходном снимке зависит от размеров усредняющего окна и разрешающей способности исходного РЛИ по координатам  $X, Y$ . Число наблюдений вычисляется по следующей формуле

$$N = \frac{N_Y N_X M_Y M_X}{\rho_Y \rho_X}, \quad (7.4)$$

где  $N_Y, N_X$  – размеры окна усреднения в пикселях;  $M_Y, M_X$  – масштабы исходного РЛИ (шаг пикселей);  $\rho_Y, \rho_X$  – разрешение исходного РЛИ по координатам дальности и азимута соответственно.

Реальное число наблюдений в сглаженном РЛИ характеризуют параметром – эквивалентное число наблюдений  $ENL$  (Equivalent Number of Looks), которое может быть найдено по характеристикам выходного РЛИ на участках с однородным отражением (поля, леса). Оно равно отношению квадрата среднего значения к дисперсии флуктуаций или квадрату отношения среднего к стандартному отклонению (СКО) отсчетов. Для амплитудного изображения (АРЛИ) имеем

$$ENL = \left\{ \frac{\text{mean}_A}{0,5228 \text{ std}_A} \right\}^2 = \frac{M_1(A_{m,n})^2}{0,5228^2 \{M_2(A_{m,n}) - M_1(A_{m,n})^2\}}, \quad (7.5)$$

где  $\text{mean}_A = M_1(A_{m,n})$  – первый момент (среднее) амплитудного распределения;  $\text{std}_A = \sqrt{D(A_{m,n})} = \sqrt{M_2(A_{m,n}) - M_1(A_{m,n})^2}$  – СКО флуктуаций;  $M_2$  и  $D$  – второй момент и дисперсия амплитудного распределения; коэффициент в знаменателе учитывает отношение СКО к среднему для закона Рэлея.

Для энергетического изображения (ЭРЛИ) имеем аналогично

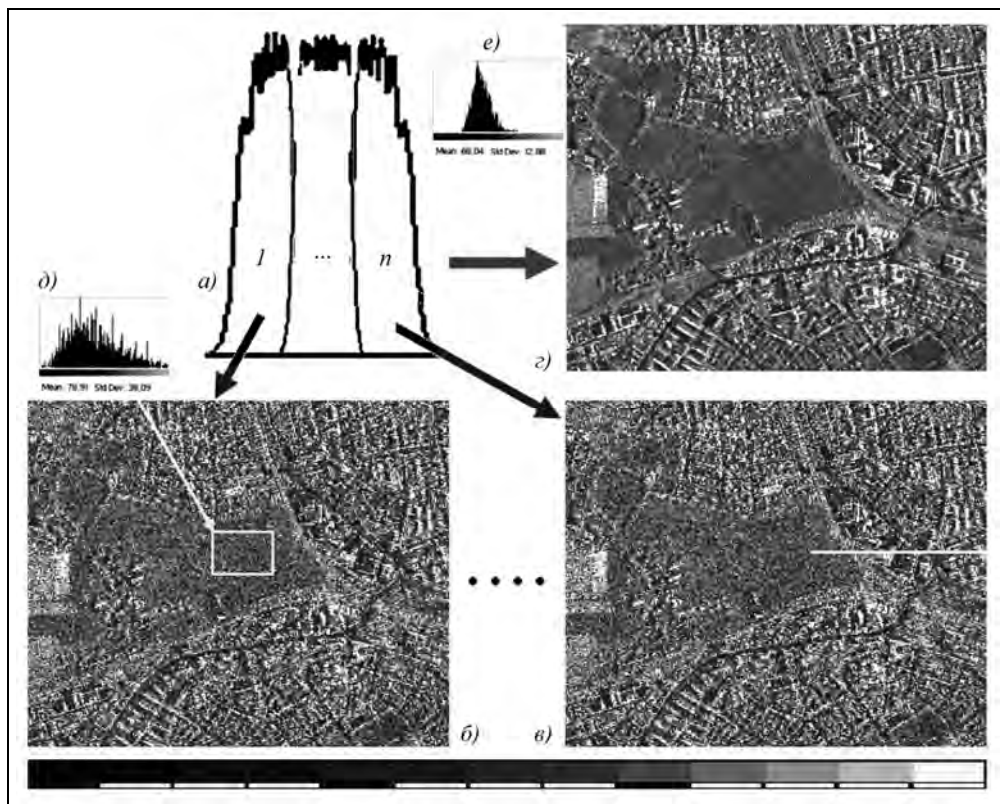
$$ENL = \frac{\text{mean}_E^2}{\text{std}_E^2} = \frac{M_1(E_{m,n})}{M_2(E_{m,n}) - M_1(E_{m,n})^2}. \quad (7.6)$$

При  $ENL > 10$  плотность вероятности в обоих случаях приближается к нормальному закону. Оценка  $EML$  по АРЛИ может давать погрешность вычисления до 1,6 дБ по сравнению с оценкой по ЭРЛИ, которую обычно применяют на практике.

Заметим, что расчет  $EML$  по формулам (7.5), (7.6) для РЛИ, представленным в формате JPG (например, в электронных публикациях статей), может дать значения, в несколько раз превышающие ожидаемые. В JPG при сжатии объема информации реализуется фильтрация спекл-шума, а отображение контрастных объектов может сопровождаться артефактами в виде повторов, что требует особого внимания при пользовании этим форматом.

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

На рис. 7.4 дана иллюстрация формирования РЛИ путем некогерентного накопления. Показаны парциальные РЛИ с одним наблюдением и сглаженное РЛИ, полученное путем усреднения в сумме  $N_x \times N_y = 16$  отсчетов с эквивалентным накоплением  $ENL = 12$  наблюдений по азимуту и дальности. Парциальные РЛИ получены из фрагмента КРЛИ г. Розенхайм, снятого с помощью РСА TerraSAR-X в проекторном режиме с разрешением около  $1,3 \times 1,5$  м (дальность  $\times$  азимут, измеренные значения). Показанные на рис. 7.4, б и в первичные РЛИ имеют разрешение около 3 м. Они сформированы из исходного КРЛИ путем децимации в 4 раза. Результирующее РЛИ показано на рис. 7.4, з.



**Рис. 7.4.** Формирование РЛИ с некогерентным накоплением (TerraSAR-X, Infoterra GmbH© [530]):  
а – субспектры сигнала; б, в – парциальные РЛИ; з – сглаженное РЛИ  $N=12$ ;  
д, е – гистограммы луга на исходном (д) и сглаженном (е) АРЛИ

Приведены также гистограммы для отмеченного прямоугольником на рис. 7.4, б фрагмента РЛИ, имеющего однородную отражающую поверхность (луг). Плотность вероятности распределения амплитуды на этом фрагменте близка к закону Рэля (измеренное отношение СКО к среднему  $\sigma_A / M_A = 0,48$  близко к значению 0,5228 для распределения Рэля [1]).

Рассмотренный на рис. 7.4 случай некогерентного накопления дает прямой выигрыш в улучшении радиометрического разрешения пропорционально квадратному корню из числа наблюдений. Однако его реализация без потери пространственного разрешения возможна только при наличии запаса по независимым наблюдениям, например, в космических РСА среднего разрешения (~30 м), предназначенных для дистанционного зондирования Земли. В РСА высокого разрешения некогерентное накопление без потери пространственного разрешения обеспечивается в прожекторном режиме съемки путем увеличения времени наблюдения и реализации когерентной и некогерентной обработок радиолограмм.

Используют два варианта некогерентного накопления суммирования парциальных РЛИ (внутриэлементное накопление) или отсчетов детального РЛИ (межэлементное накопление) при его усреднении по площади окна:

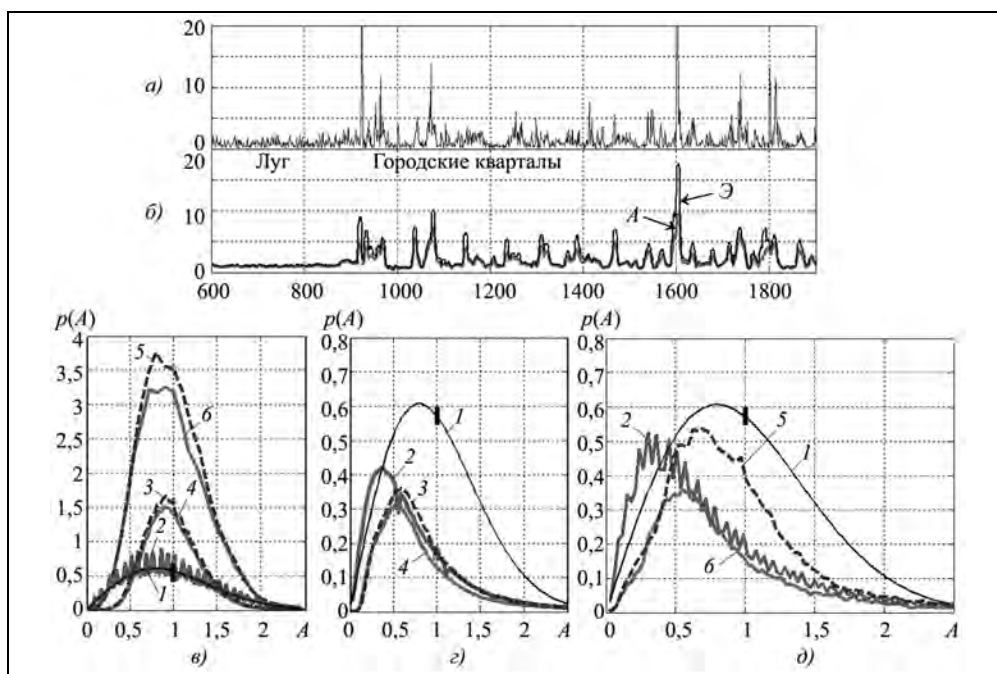
- 1) *суммирование по амплитуде (АРЛИ)*;
- 2) *суммирования по яркости (ЭРЛИ) – квадрату амплитуды*.

Во втором случае обычно после суммирования парциальных ЭРЛИ делают обратный переход к амплитуде путем извлечения квадратного корня из суммы отсчетов яркостей. Как показано в разделе 7.4, амплитудное РЛИ более подходит для зрительного восприятия, а также для печати твердой копии РЛИ). Иногда для регистрации РЛИ в цифровом виде используют формат отсчетов ЭРЛИ в децибелах, соответствующих удельной ЭПР каждого пикселя РЛИ.

После проведенного усреднения сглаженное АРЛИ обычно прореживают (децимируют) в число раз, равное или меньшее  $N_Y$  и  $N_X$  по соответствующим координатам с интерполяцией для получения равномасштабного РЛИ в плановой проекции.

Следует отметить, что суммирование яркостей (ЭРЛИ) было исходной операцией некогерентного накопления в оптических устройствах синтеза РЛИ (экспонирование вторичной фотопленки). Получаемое РЛИ регистрировали на негативной фотопленке, после чего печатали на фотобумаге в виде позитивного изображения. В ходе этих операций происходят нелинейные преобразования радиолограммы и РЛИ в зависимости от коэффициентов контрастности химико-фотографической обработки фотоматериалов [149\*, 151\*]. В конечном счете, эти нелинейности сказываются на изобразительных свойствах и дешифрируемости РЛИ, представленных на твердых копиях.

Варианты усреднения РЛИ по амплитуде или яркости дают близкие результаты при наблюдении однородной шероховатой поверхности. На рис. 7.5, а показаны сечения РЛИ по горизонтали (линия на рис. 7.4, в), а также гистограммы распределения амплитуд при одном наблюдении и при некогерентном накоплении в обоих вариантах (усредненные выходные АРЛИ). Графики для разного числа наблюдений совмещены по среднему значению. Участок анализа – луг, обозначенный прямоугольником на рис. 7.4, б, с переходом к городским кварталам в правой части фрагмента РЛИ. Для сравнения приведены гистограммы АРЛИ без накопления и кривые рэлеевского распределения амплитуды.



**Рис. 7.5.** Сечения АРЛИ по дальности (*а, б*) и гистограммы (*в, з*) исходных АРЛИ и АРЛИ после некогерентного накопления:

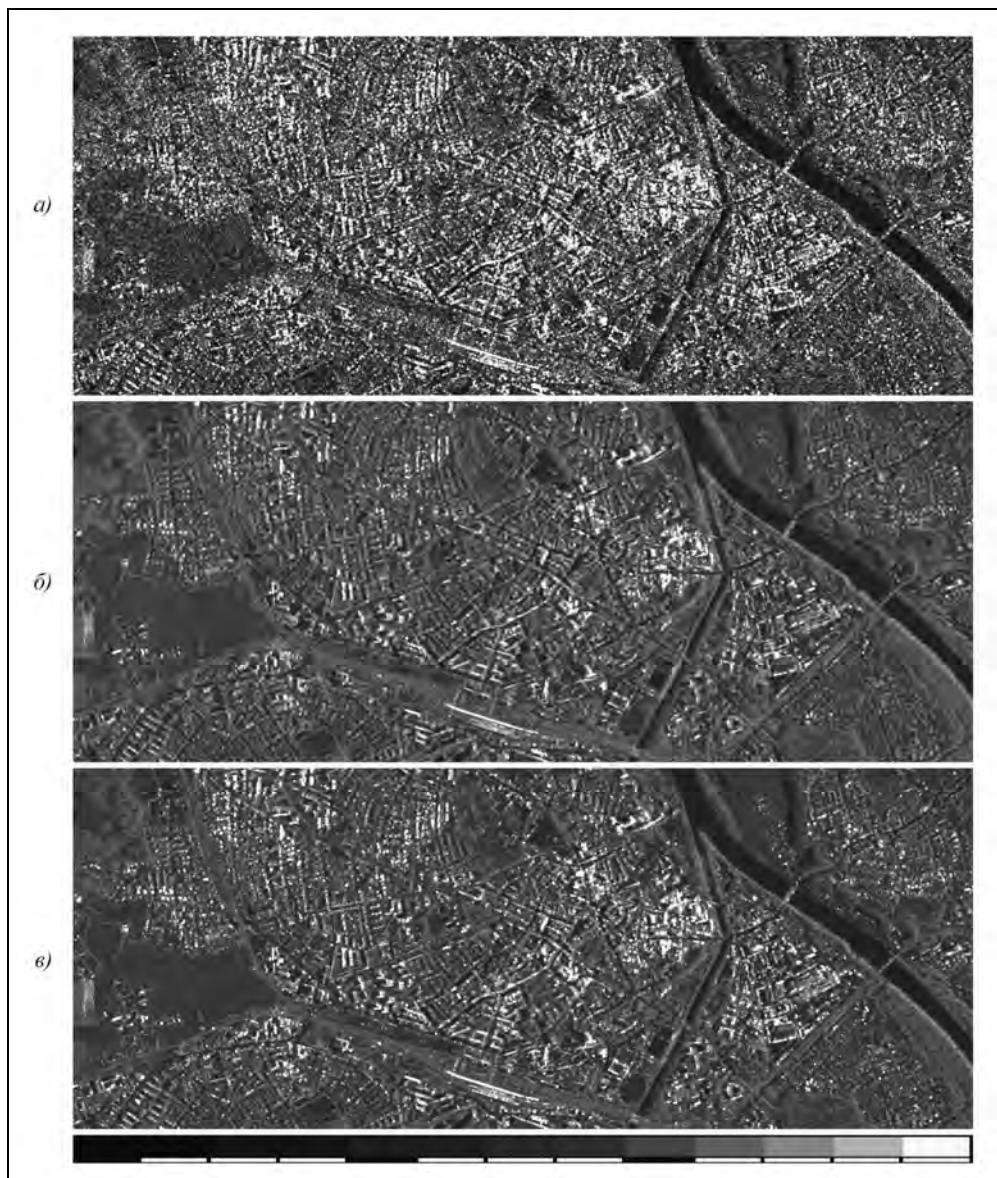
*а* – исходное АРЛИ без некогерентного накопления, *б* – АРЛИ после усреднения амплитуд (кривая *А* –  $ENL=23$ ) и после усреднения ЭРЛИ и преобразования к АРЛИ (кривая *Э* –  $ENL=23$ , на *а* и *б* по оси абсцисс отложены отсчеты дальности, по оси ординат – отношение амплитуды к ее среднему уровню на участке луга); *в* – однородная поверхность (отмечена прямоугольником на рис. 7.4,б); *з* – РЛИ, показанное на рис. 7.4, накопление  $N=5$ . Средний уровень возрастает на 4 дБ за счет мощных целей; *д* – РЛИ, показанное на рис. 7.4, накопление  $N=32$ : (*1* – теоретическая кривая распределения Рэлея; *2* – АРЛИ при  $N=1$ ; *3* и *5* – усреднение АРЛИ,  $N=4$  (*3*) и  $N=32$  (*5*); *4* и *6* – усреднение ЭРЛИ,  $N=4$  (*4*) и  $N=32$  (*6*))

На рис. 7.6 дано сравнение РЛИ, сглаженных путем усреднения амплитуд или яркостей с помощью окна  $8 \times 8$ , что при выбранной частоте дискретизации РЛИ соответствует ухудшению пространственного разрешения с 3 до 12 м. Во втором случае контрастность ярких целей на сглаженном АРЛИ (после извлечения квадратного корня из сглаженного ЭРЛИ) заметно выше, что подтверждается кривыми *А, Э* на рис. 7.5,б. В подрисовочной подписи приведены значения  $ENL$  для РЛИ луга.

Для исходного РЛИ однородной поверхности при одном наблюдении плотности распределения (рис. 7.5,в) практически совпадает с теоретическим рэлеевским распределением для случайного гауссова процесса (кривая *1*).

Если снимаемая местность включает яркие цели (городская застройка), то гистограмма преобразуется и имеет вид, показанный на рис. 7.5,б,в. Из-за влияния мощных целей, в сотни и тысячи раз превышающих диапазон приведенных графиков, кривые перемещаются влево относительно среднего значения, равного единице. Гистограммы для однородного фона при суммировании АРЛИ и ЭРЛИ близки. Но по городским кварталам гистограммы существенно различаются. При суммировании

АРЛИ возрастают погрешности измерения ЭПР отдельных ярких целей (до 10 дБ), особенно при большом усреднении. Таким образом, корректная процедура – суммирование энергетических РЛИ.



**Рис. 7.6.** Варианты некогерентного накопления РЛИ:

*a* – вид РЛИ с одним наблюдением  $\sigma/M_1 = 0,53$ ,  $ENL = 0,97$  (участок луга), разрешение  $\rho_{xy} \approx 3$  м; *б* и *в* – выходные АРЛИ, полученные суммированием амплитуд (*б*) и путем суммирования парциальных ЭРЛИ (*в*) (в обоих случаях по участку луга  $\rho_{xy} \approx 12$  м,  $\sigma/M_1 = 0,11$ ;  $ENL = 23$ ; TerraSAR-X, Infoterra GmbH© [530])

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

---

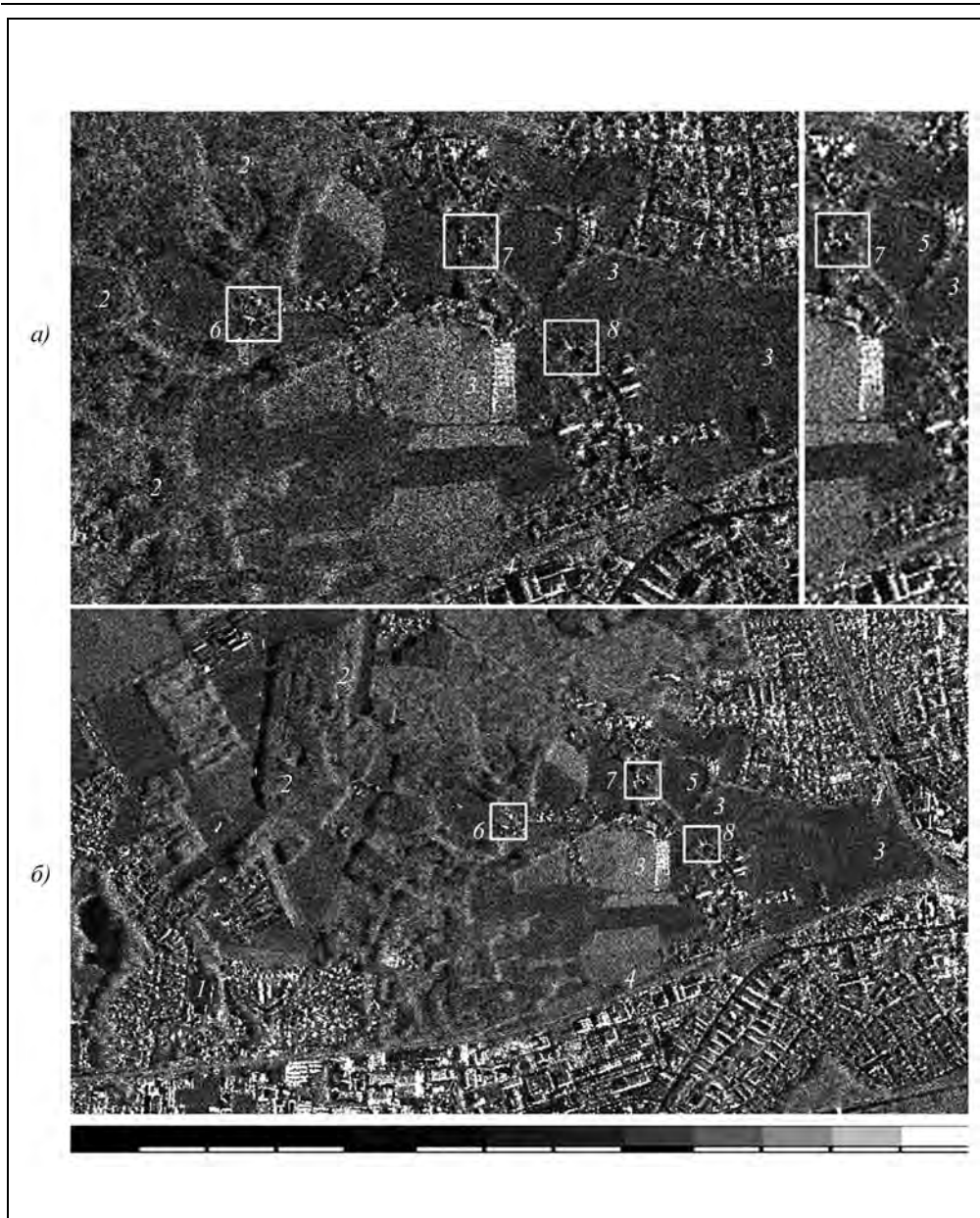
Рассмотренные выше примеры относятся к ситуации, когда имеется запас по времени наблюдения, который используют для некогерентного накопления. Более типична другая ситуация (маршрутные режимы, Скансар), когда такой запас отсутствует, некогерентное накопление реализуют за счет ухудшения пространственного разрешения. Вариант улучшенного пространственного разрешения можно использовать для формирования банка радиолокационных портретов объектов, а улучшенное радиометрическое разрешение и изобразительные свойства РЛИ – для общих мониторинговых задач и обнаружения групповых объектов.

На рис. 7.7 приведены РЛИ сельской местности при высоком пространственном разрешении (~2 м, одно наблюдение) и при сглаживании четырех наблюдений (окном 2×2), которое резко улучшает изобразительные свойства РЛИ. Потери в вероятности обнаружения групповых объектов (выделены прямоугольниками на РЛИ), размеры которых превышают размеры элемента сглаженного РЛИ (4 м), практически отсутствуют, если выбранный масштаб РЛИ достаточен для восприятия мелких объектов, как это приведено на рис. 7.7,в. Крупный масштаб, подчеркивающий зернистость РЛИ, менее пригоден для дешифрирования протяженных объектов. На практике при компьютерном дешифрировании РЛИ изменение масштаба является рутинной процедурой.

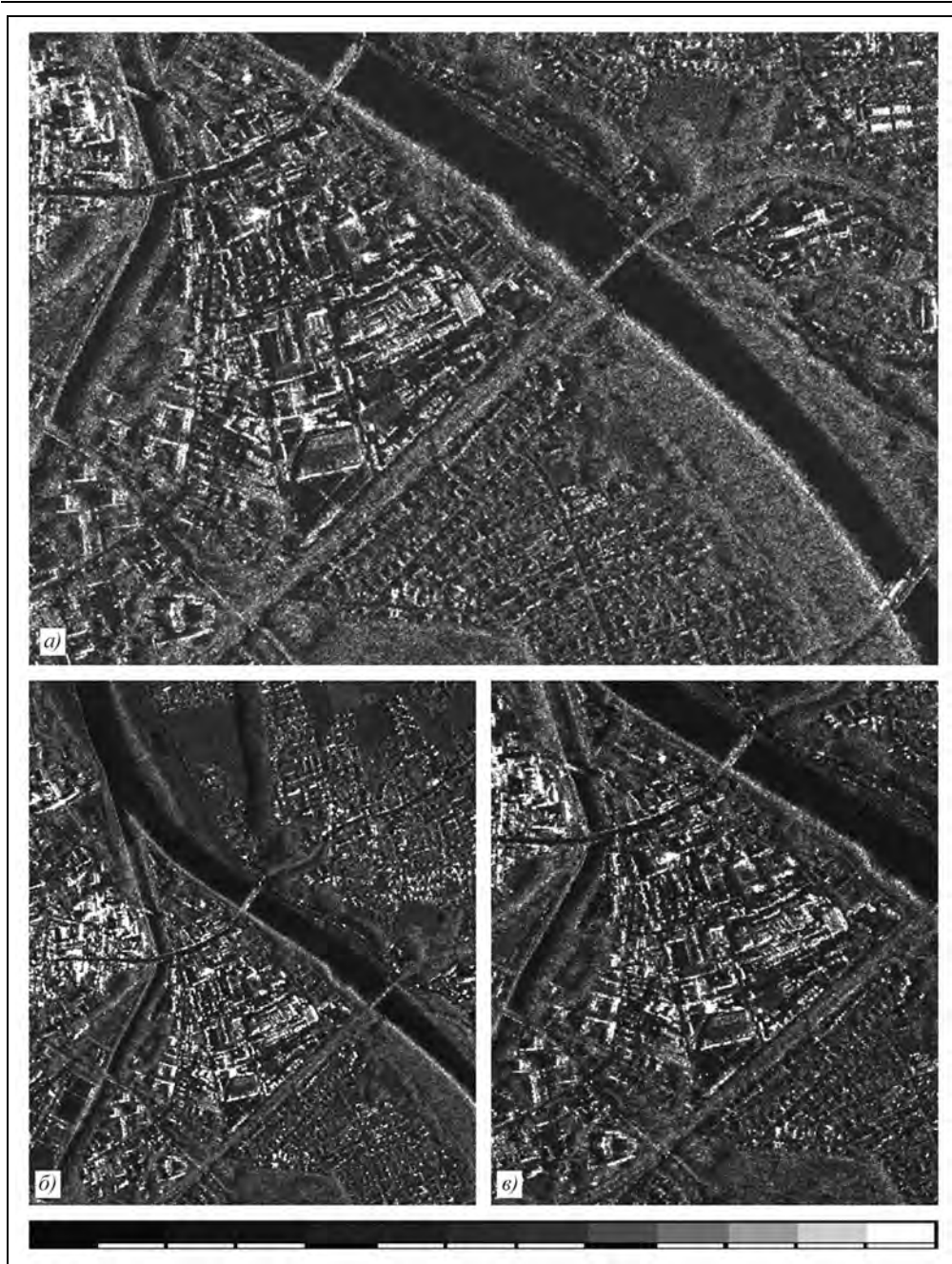
На рис. 7.8 показаны исходное РЛИ с пространственным разрешением ~1,5 м, а также сглаженные РЛИ – 3 наблюдения с разрешением 2,5 м и 11 наблюдений с разрешением 5 м. Снижение флюктуаций изображения протяженных объектов приводит к повышению контраста компактных объектов и способствует их обнаружению на окружающем фоне. Заметим, что в выходном информационном продукте РСА TerraSAR-X предусмотрена альтернатива: улучшение пространственного или радиометрического разрешения, в том числе при съемке в прожекторном режиме с расчетным пространственным разрешением 1 м [572, 573].

Вообще говоря, возможности снижения спекл-шума на РЛИ путем некогерентного накопления ограничены допустимым ухудшением пространственного разрешения до пределов, когда теряется информация об объекте. Это связано с тем, что спекл-шум, вызванный интерференцией сигналов от элементов группового или распределенного объекта, является порождением совокупного отражения радиоволн от данного объекта или участка местности, в котором содержится информация о среднем (по ансамблю) значении удельной ЭПР в усредняемой площадке разрешения.

В реальных условиях дешифрирования радиолокационных снимков для решения тематических задач приходится искать компромисс между улучшением радиометрического и ухудшением пространственного разрешения. Применительно к задаче оценки урожайности при сельскохозяйственном мониторинге эффективно усреднение РЛИ до размеров элемента разрешения 30...50 м. Но при мониторинге лесных массивов при таком разрешении могут быть потеряны текстурные признаки, характеризующие породы деревьев. Для ледовых покровов критические размеры площадки усреднения составляют 300×300 м<sup>2</sup> [87].



**Рис. 7.7.** Сравнение первичного РЛИ высокого разрешения 2 м с одним наблюдением (а) и сглаженных РЛИ при четырех наблюдениях и разрешении 4 м – полного РЛИ (б) и его центральной части в масштабе, совпадающем с первичным РЛИ (б):  
1 – озеро, 2 – леса, 3 – поля, 4 – застроенная территория,  
5 – лесопосадки, 6–8 – групповые объекты, отмеченные рамками  
(северо-западные окрестности г. Розенхайм. TerraSAR-X, Infoterra GmbH© [530])



**Рис. 7.8.** Сравнение первичного РЛИ высокого разрешения (~1,5 м) с одним наблюдением (а) и сглаженных РЛИ при числе наблюдений  $N=3$  с разрешением 2,5 м (б) и при  $N=11$  с разрешением ~5 м (в)  
(фрагмент РЛИ г. Розенхайм; TerraSAR-X, Infoterra GmbH© [531])



Как следует из рис. 7.8, при сглаживании исходного РЛИ, которое сопровождается ухудшением пространственного разрешения (но не более 5...7 м), вероятность обнаружения групповых объектов (зданий, мостов) практически не изменяется. А для уточнения особенностей конструкции объекта необходим переход к детальным снимкам (двухэтапное дешифрирование). Соответственно рабочие места операторов, выполняющих тематическую обработку радиолокационных снимков, должны располагать программным обеспечением, позволяющим гибко варьировать параметры некогерентного накопления при отображении РЛИ.

### **7.1.3. Базовые алгоритмы фильтрации спекл-шума**

Широкое развитие алгоритмов фильтрации спекл-шума относится к 1980–1990 гг. Их систематизация и аналитический обзор представлен в статье [22]. Основная цель, решаемая при фильтрации спекл-шума – повышение точности измерения УЭПР пространственно распределенных объектов с сохранением информации, содержащейся в текстурных признаках, характеризующих отраженный сигнал, гистограммах его распределения, включая возможности поляриметрической обработки. В публикациях последних лет рассмотрены пути применения методов вейвлет-фильтрации, фрактального анализа, нейронных сетей.

Разработка математического аппарата адаптивной фильтрации спекл-шума основана на моделях, аппроксимирующих законы распределения отраженного сигнала от наблюдаемой поверхности в зависимости от ее характера: распределение Рэлея (шероховатая поверхность), Райса (наличие когерентной составляющей отражения), Вейбулла, *K*-распределение (морская поверхность). В ряде случаев используют непараметрический подход, не требующий точного знания закона распределения [379]. Наиболее часто для аналитического описания исходного РЛИ рассматривают ряд моделей взаимодействия сигнала и шума. Самая простая из них – модель мультипликативного шума

$$u(x, y) = S(x, y)n(x, y), \quad (7.7)$$

где  $x, y$  – координаты пикселя на РЛИ;  $S(x, y)$  – стационарная составляющая (текстура), значение которой может быть найдено при усреднении сигналов по ансамблю;  $n(x, y)$  – случайная составляющая, не зависящая от сигнала и определяемая мгновенным распределением фаз элементарных отражателей в элементе разрешения при конкретных ракурсе и угле места наблюдения.

Следующая по сложности – это модель аддитивного шума, модулируемого сигналом

$$u(x, y) = S(x, y) + f\{S(x, y)\}n(x, y), \quad (7.8)$$

где  $f\{S(x, y)\}$  в общем случае, нелинейная функция.

Модификация модели (7.7) для описания нестационарных РЛИ – мультипликативная модель с аддитивным средним

$$u(x, y) = S(x, y) + [q + r(x, y)], \quad (7.9)$$

где  $q$  – среднее значение помехи;  $r(x, y)$  – стационарный эргодический процесс с нулевым средним.

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Используют также обобщенную модель взаимодействия, учитывающую мультипликативную и аддитивную составляющие

$$u(x, y) = S_1(x, y) + S_2(x, y)q(x, y) + r(x, y), \quad (7.10)$$

где  $S_1(x, y)$  и  $S_2(x, y)$  – компоненты изображения, представляющие собой линейные или нелинейные функции от идеального РЛИ без флуктуаций  $S(x, y)$ . Эти компоненты коррелированы между собой, но статистически независимы от шумов  $q(x, y)$  и  $r(x, y)$ .

Как показывает анализ материалов радиолокационной съемки с получением РЛИ, значительно отличающихся по пространственному разрешению (от единиц метров), во многих случаях достаточно применение простейшей модели (7.7).

Локальные адаптивные фильтры основаны на формировании локальных статистик относительно центрального пикселя в окне обработки и принятии решения о выборе формулы для расчета центрального элемента. Широко известны алгоритмы фильтрации спекл-шума Ли, Куана, Фроста, расширенный Ли, расширенный Фроста, медианный, фильтр максимального правдоподобия. Эти базовые алгоритмы основаны на оценке статистических характеристик локальных фрагментов РЛИ (в окне от  $3 \times 3$  до  $9 \times 9$  и более), окружающем анализируемый пиксель РЛИ. По результатам анализа принимается решение о значении отсчета в центральном пикселе (например, взвешенная сумма исходного и усредненного по окну значений) [16, 297, 373, 394, 423, 494, 560].

В ходе многолетней эксплуатации космических РСА и практического использования материалов радиолокационной съемки подтверждена правильность подходов к проблеме фильтрации спекл-шума, получена сравнительная оценка этих алгоритмов и заложена база для разработки новых алгоритмов с использованием современных вычислительных методов обработки радиолокационной информации РСА нового поколения. В публикациях о новых алгоритмах фильтрации РЛИ либо приводят сравнение с перечисленными «классическими» алгоритмами, либо используют их в качестве основы для первичной обработки РЛИ.

Кратко рассмотрим основные алгоритмы фильтрации спекл-шума. Алгоритм Ли исходит из мультипликативной модели спекл-шума (7.7). Выходной отсчет ЭРЛИ (или АРЛИ) в центральном пикселе окна  $W$  вычисляют по формуле

$$E_N = E_k W + E_W (1 - W), \quad (7.11)$$

где  $E_k$  – отсчет ЭРЛИ в центральном пикселе окна  $k=(m, n)$ ;  $E_W = \text{mean}\{E_k\}_W$  – среднее значение отсчетов по окну с центром в  $k$ ;  $W = 1 - ENL/N$  – весовая функция (здесь  $N$  – расчетное число наблюдений для однородной поверхности, измеренное по РЛИ или рассчитанное по формуле (7.4);  $ENL$  – измеренное по ЭРЛИ эффективное число наблюдений для локальной области окна  $W$ , вычисленное с учетом формулы (7.6)).

В результате имеем

$$E_N = E_k \left( 1 - \frac{ENL}{N} \right) + E_W \frac{ENL}{N}. \quad (7.12)$$

Таким образом, когда попадающий в окно участок местности однороден,  $ENL \geq N$ , фильтр Ли работает как простой сглаживающий фильтр. В противном слу-

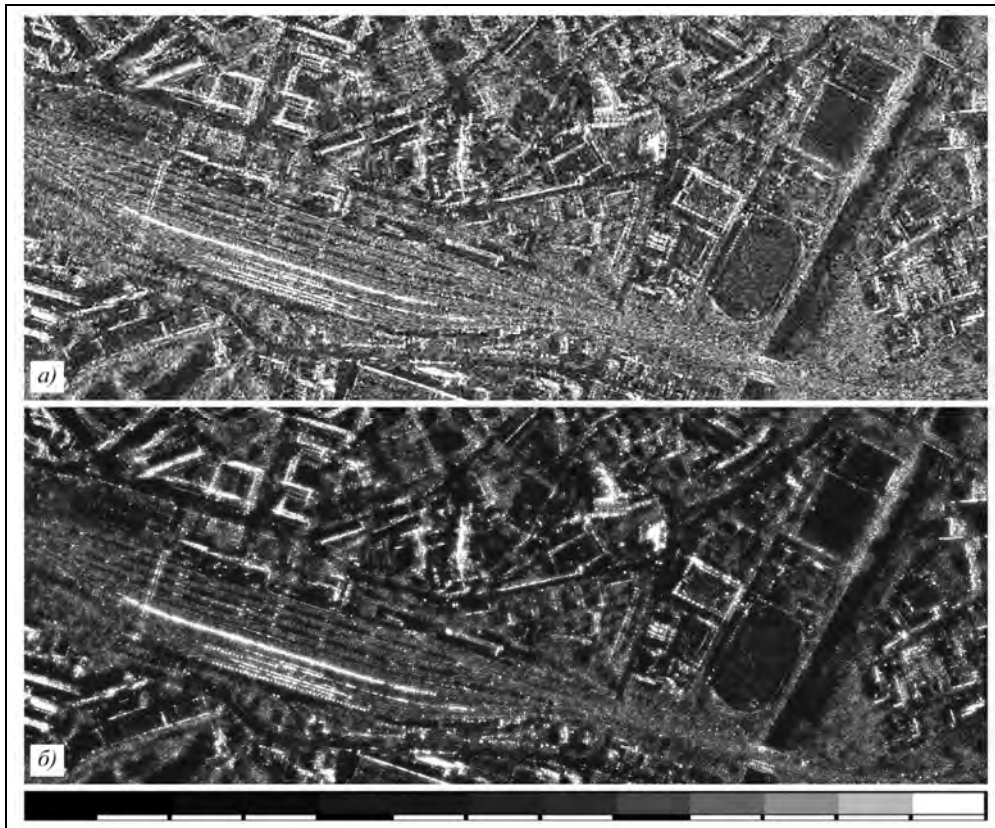
чае он вычисляет взвешенную сумму реального значения и среднего значения в соответствии с (7.11). Условие  $ENL \geq N$  является критерием однородной поверхности.

Фильтр Куана предполагает преобразование мультипликативного шума к аддитивной модели, зависящей от сигнала  $u(x,y)$  (7.8). К этой модели применяют критерий минимума среднеквадратичной ошибки. Формула для вычисления выходных отсчетов РЛИ совпадает с алгоритмом Ли (7.11), но весовая функция имеет отличие

$$W = 1 - ENL / (N + 1). \quad (7.13)$$

В результате, для однородной поверхности, когда  $ENL \approx N$ , в каждом пикселе выходного РЛИ имеем полусумму отсчетов исходного РЛИ в данном пикселе и усредненного значения по окну. Если неравномерность отсчетов по окну велика, то в выходное РЛИ записывают значения исходного РЛИ.

На рис. 7.9 приведено сравнение исходного РЛИ высокого разрешения (~1,5 м) с одним наблюдением и результата фильтрации путем взвешенного суммирования исходного и сглаженного ( $N=5$ ) изображений, которое является частным случаем



**Рис. 7.9.** Снижение спекл-шума путем взвешенного суммирования исходного РЛИ высокого разрешения (а) и сглаженного РЛИ (б):  
а – исходное РЛИ с разрешением ~1,5 м; б – суммарное РЛИ (1+1)  
(железнодорожный вокзал и стадион в г.Розенхайм; TerraSAR-X, Infoterra GmbH© [530])

алгоритмов Ли и Куана. Заметно увеличение контраста РЛИ групповых объектов (железнодорожные составы, обустройство путевого хозяйства) и улучшение наблюдаемости протяженных объектов (уличные проезды, стадион и др.).

Адаптивный фильтр Фроста использует модель мультипликативного шума в предположении, что сигнал имеет экспоненциальную автокорреляционную функцию (РЛИ стационарно и однородно в пределах окна). Отличие фильтра Фроста от фильтров Ли и Куана в том, что он оценивает отражающую способность сцены путем свертки наблюдаемого РЛИ и импульсной реакции РСА. Применение фильтра требует формирования окна с круговой симметрией, которое характеризуется набором коэффициентов взвешивания, зависящих от положения отсчетов РЛИ в окне

$$M = \exp\{-D_R R_i / ENL\}, \quad (7.14)$$

где  $D_R$  – коэффициент демпфирования, задающий спадание весовой функции;  $R_i$  – расстояние  $i$ -го пикселя в окне от центрального пикселя.

Результирующая формула для вычисления выходных отсчетов РЛИ имеет вид

$$E_N = \frac{1}{\sum_{N_X \times N_Y} M_i} \sum_{N_X \times N_Y} E_i M_i. \quad (7.15)$$

Таким образом, для однородной поверхности фильтр Фроста будет усреднять отсчеты РЛИ в круговой области окна, задаваемой коэффициентом демпфирования. При появлении неоднородности диаметр усредняемой области будет уменьшаться, пока не сравняется с центральным пикселем. Фильтр Фроста, в отличие от фильтров Ли и Куана, требует увеличенных вычислительных затрат, при этом не устраняет присущих указанным фильтрам искажений при наблюдении линейных объектов на РЛИ и на границах однородных участков.

Расширенные фильтры Ли и Фроста предусматривают оценку однородности исходного РЛИ в локальной области окна и выбор альтернативной стратегии для формирования выходного РЛИ: для однородной поверхности, текстуры и изолированных точечных целей [394]. В качестве параметра однородности используют соотношение между измеренным в окне эффективным числом наблюдений  $ENL$  и расчетным числом наблюдений  $N$ . Для расширенного фильтра Ли имеем выражение для отсчетов выходного РЛИ

$$E_N = \begin{cases} E_W & \text{при } ENL \geq N_{\max}; \\ E_k W + E_W (1 - W) & \text{при } N_{\max} < ENL < N; \\ E_k & \text{при } N \geq ENL, \end{cases} \quad (7.16)$$

где  $E_k$  – отсчет исходного РЛИ в центре скользящего окна;  $E_W$  – усредненные отсчеты по окну

$$W = \exp\{-D_R (C_i - C_u) / (C_{\max} - C_i)\}, \quad (7.17)$$

– весовая функция (здесь  $C_u = 1/\sqrt{N}$ ;  $C_i = \text{std}_W / \text{mean}_W = 1/\sqrt{ENL}$ ;  $C_{\max} = \sqrt{1+2/N}$  – порог идентификации текстуры в окне РЛИ;  $D_R$  – коэффициент демпфирования, задающий спадание весовой функции).

Работа расширенного фильтра Фроста аналогична фильтру Ли, но только с тем отличием, что весовая функция имеет круговую симметрию

$$M = \exp\{-R_R R_i (C_i - C_u) / (C_{\max} - C_i)\}, \quad (7.18)$$

где  $R_i$  – расстояние  $i$ -го пикселя в окне от центрального пикселя.

Результирующая формула для вычисления выходных отсчетов РЛИ при альтернативных значениях параметра, характеризующего однородности РЛИ в окне, имеет вид

$$E_N = \begin{cases} E_W & \text{при } ENL \geq N_{\max}; \\ \frac{1}{\sum_{N_X \times N_Y} M_i} \sum_{N_X \times N_Y} E_i M_i & \text{при } N_{\max} < ENL < N; \\ E_k & \text{при } N \geq ENL, \end{cases} \quad (7.19)$$

К фильтрам, построенным на порядковых статистиках, относится предложенный Ли сигма-фильтр [379, 380], который учитывает, что для нормально распределенной случайной величины с СКО, равной  $\sigma$ , вероятность ее попадания в интервал  $\pm 2\sigma$  относительно среднего уровня равна 0,995. Принцип алгоритма сигма-фильтрации состоит в том, что по фрагменту РЛИ в пределах окна  $N_X \times N_Y$  вычисляют средний уровень  $M_A$  и СКО флуктуаций  $\sigma_A$

$$\begin{aligned} \sigma_A &= \text{std}\{A_i\} = \sqrt{D_A - M_A^2}; \\ M_A &= \text{mean}\{A_i\}; \\ D_A &= \text{mean}\{A_i^2\} - \text{mean}\{A_i\}^2. \end{aligned} \quad (7.20)$$

По этим данным формируют два плавающих порога относительно среднего уровня

$$k_{\text{por1}} = 1 - \frac{a_1 \sigma_A}{M_A}; \quad k_{\text{por2}} = 1 + \frac{a_2 \sigma_A}{M_A}, \quad (7.21)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты порога, в общем случае разные (см. ниже). Для выделения отсчетов РЛИ внутри интервала между порогами формируют локальную маску

$$\delta_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{если } A(m+k, n+l) K_{\text{por1}} \leq A(m+k, n+l) \leq A(m+k, n+l) K_{\text{por2}} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (7.22)$$

Отсчеты выходного РЛИ определяются путем усреднения отсчетов входного РЛИ, если они близки (в пределах, определяемых порогами) к центральному отсчету

$$A_N(m, n) = \frac{\sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} \delta_{kl} A(m+k, n+l)}{\sum_{k=-N_Y/2+1}^{N_Y/2} \sum_{l=-N_X/2+1}^{N_X/2} \delta_{kl}}. \quad (7.23)$$

Сглаживание процедурой (7.23) проводят путем итераций (до четырех), удовлетворительное качество РЛИ получается уже при двух итерациях, увеличение более четырех итераций приводит к смазыванию мелких деталей на РЛИ. Отмечается простота алгоритма и умеренные требования к вычислительным средствам сравнительно с другими базовыми алгоритмами.

Модификации и усовершенствования базовых алгоритмов фильтрации спекл-шума, а также их применение для поляриметрических РЛИ приведены в [373, 381, 382, 393, 394].

#### 7.1.4. Модернизированные алгоритмы фильтрации спекл-шума. Применение вейвлет-преобразования

Прогресс в развитии аппаратно-программных средств и совершенствование радиолокационной аппаратуры в направлении повышения разрешающей способности, поляриметрического зондирования и интерферометрической обработки позволяет существенно усовершенствовать базовые алгоритмы фильтрации РЛИ и устранить присущие им недостатки, которые в значительной степени были вызваны стремлением упростить требования к процессорам обработки изображений. Взгляд с новых позиций позволяет тщательно проанализировать недостатки базовых алгоритмов и найти пути их устранения. Так, в [320] рассмотрены возможности устранения основных недостатков алгоритма сигма-фильтрации: необходимость предварительного сглаживания РЛИ ( $N \geq 4$ ) для нормализации закона флуктуаций, «размазывание» отметок от ярких целей, плохая фильтрация темных точечных отметок на РЛИ. Проведенная модернизация алгоритма позволяет использовать его для обработки РЛИ высокого разрешения с одним и более наблюдений, устраняет радиометрические искажения и позволяет фильтровать участки с низким отражением. Это реализуется

- выбором коэффициентов порогов  $a_1, a_2$  в формуле (7.21) с учетом несимметрии закона распределения отсчетов РЛИ;

- кластеризацией отметок от ярких целей путем совместной обработки отсчетов в окнах с разными размерами ( $3 \times 3$  и  $5 \times 5$ ). Предварительно по всему РЛИ оценивается статистика распределения ярких отсчетов, уровень которых превышает порог на 98 % вероятности. Оценивается число таких отметок в окне  $3 \times 3$  и, если оно, включая центральный пиксель, превышает заданный порог ( $K_{\text{пор}} = 5-6$ ), все яркие цели передаются в выходное РЛИ без фильтрации;

- применением оценки минимума СКО для центрального элемента в окне  $3 \times 3$  в соответствии с формулами

$$A_N = A_k W + A_W (1 - W), \quad (7.24)$$

где

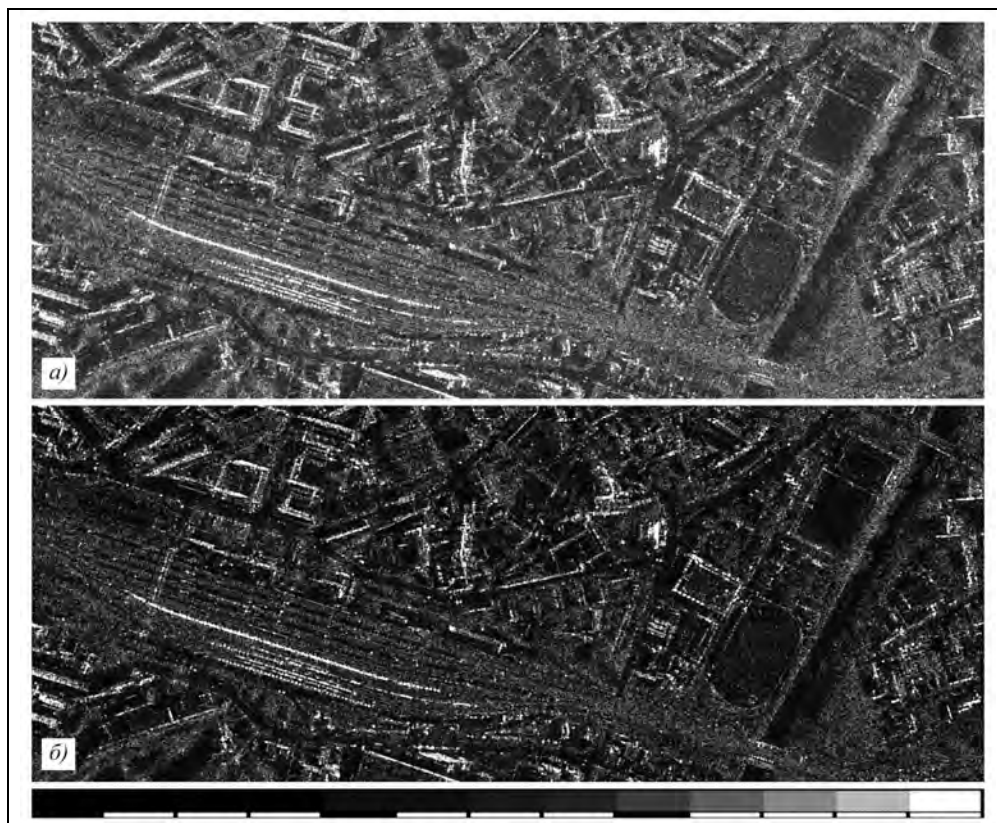
$$W = D(A_Z) / D(A_i), \quad (7.25)$$

$$D(A_Z) = \frac{D(A_i) - A_W^2 \text{std}\{n(x, y)\}^2}{1 + \text{std}\{n(x, y)\}^2}. \quad (7.26)$$

Здесь  $A_N$  – отфильтрованный центральный отсчет в выходном РЛИ;  $A_k$  – центральный отсчет в исходном РЛИ;  $A_W = \text{mean}\{A_i\}$  – среднее значение отсчетов исходного РЛИ в окне;  $W$  – весовая функция;  $D(A_Z)$  – вычисленная в текущем окне дисперсия по ярким целям, входящим в кластер;  $D(A_i)$  – дисперсия всех отметок в окне;  $n(x,y)$  – закон распределения модели мультипликативного шума (7.7) для входного РЛИ с учетом числа наблюдений при его предварительном сглаживании.

На рис. 7.10 показан результат обработки исходного РЛИ высокого разрешения ( $N = 1$ ) с помощью модернизированного алгоритма сигма-фильтрации. В отличие от рис. 7.9 на выходном снимке лучше просматривается структура отражения от элементов железнодорожных вагонов.

Рекомендации по усовершенствованию алгоритмов фильтрации РЛИ и их применению изложены в публикациях [342, 382, 383, 395, 485]. В статье [485] рассмотрено усовершенствование фильтра Ли путем адаптивного выбора окна, которое автоматически меняет разрешающую способность выходного РЛИ с учетом неоднородности отражения от наблюдаемой поверхности.



**Рис. 7.10.** Применение модернизированного алгоритма сигма-фильтрации для улучшения изобразительных свойств РЛИ:

$a$  – исходное РЛИ с разрешением  $\sim 1,5$  м;  $b$  – выходное РЛИ (железнодорожный вокзал и стадион в г. Розенхайм; TerraSAR-X, Infoterra GmbH© [530])

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Также в статье [485] рассмотрен имеющий высокую производительность метод фильтрации спекл-шума, являющийся комбинацией алгоритмов с разными порогами, применяемых к набору парциальных РЛИ – «мягкого», «жесткого» и адаптивного порогов. Поскольку спекл-шум является мультипликативным процессом для выравнивания СКО флуктуаций, выполняют логарифмирование сигнала, после чего он соответствует модели аддитивного шума. После логарифмирования отсчеты РЛИ в децибелах принимают вид

$$L_k = 10 \log E_k - 10 \log \sigma_W + \frac{10}{\ln 10} (L_k - \ln N), \quad (7.27)$$

где двойной номер  $m, n$  для краткости обозначен как  $k$ ;  $\sigma_W$  – среднее УЭПР фона в локальном окне  $W$  с центром в данном пикселе РЛИ;  $L_k$  – переменная, характеризующая плотностью распределения [505]

$$L_k = \ln(N E_k / \sigma_W); \quad (7.28)$$

$$p(L_k) = \frac{\exp\{NL_k \exp(L_k)\}}{\Gamma(N)},$$

где  $\Gamma(N) = (N-1)!$  – Гамма-функция. При  $N \geq 3$  распределение (7.28) близко к гауссову. Среднее и СКО находят через производную от Гамма-функции от аргумента  $N$

$$M_1\{L_k\} = \frac{d}{d\alpha} [\ln \Gamma(\alpha)]_{\alpha=N} = \psi(N); \quad (7.29)$$

$$\text{std}\{L_k\} = \frac{d^2}{d\alpha^2} [\ln \Gamma(\alpha)]_{\alpha=N} = \psi'_\alpha(N).$$

Для целого  $N$  можно воспользоваться следующим выражением:

$$M_1\{L_k\} = \psi(N) = -\gamma + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{n}; \quad (7.30)$$

$$\text{std}\{L_k\} = \psi'_\alpha(N) = \frac{\pi}{6} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{n^2},$$

где  $\gamma=0,57721566$  – постоянная Эйлера–Маскерони.

Далее по формуле (7.5) находят значение эффективного числа наблюдений  $ENL$  и выбирают стратегию обработки по приведенным выше алгоритмам.

Метод, изложенный в [485], предусматривает разделение сигнала на субблоки (в голограмме или спектре) разных размеров с получением разного разрешения парциальных РЛИ.

Важным фактором для выбора стратегии формирования выходного РЛИ является оценка однородности исходного РЛИ в пределах анализируемого окна. Именно она позволяет сохранить текстуру протяженных объектов на РЛИ, найти границы участков и выявить наличие компактных объектов. Кроме простых критериев сравнения значений расчетного  $N$  и эффективного  $ENL$  накопления рекомен-



дованы применение адаптированного размера и формы окон с пороговой обработкой  $ENL \leq N_{\max}$ , а также других методов улучшения изобразительных свойств РЛИ [259, 278, 381, 400].

Большие перспективы имеет применение двумерных процедур прямого и обратного вейвлет-преобразования для фильтрации РЛИ. Вейвлеты – это особый базис приближения функций и сигналов произвольной формы, имеющий вид волновых пакетов разной формы (в том числе фрактальной), локализованных по оси одной переменной ( $t$  или  $x$ ) и способных к сдвигу по ней и масштабированию. Преимущества вейвлетов – в возможности работы с действительными процессами, быстродействию, удобстве представления локальных особенностей сигналов, отсутствующим у рядов Фурье. Библиотека процедур вейвлет-преобразований входит во многие программные пакеты, включая эффективную среду обработки изображений MATLAB.

Применение вейвлет-преобразований для фильтрации РЛИ рассмотрено в статьях [73\*, 259, 362, 395, 505]. Не вдаваясь в детали алгоритмов фильтрации РЛИ, изложенных в этих и других публикациях, кратко рассмотрим принципы вейвлет-анализа применительно к задачам обработки радиолокационных изображений, для которых типично сочетание локальных неоднородностей и слабо коррелированного спекл-шума. Для адекватного представления таких данных нужен базис из функций, одновременно обладающих локализацией самих функций и их преобразований Фурье.

Таковыми свойствами обладает вейвлет-представление сигнала, которое заключается в разбивке приближения к сигналу на две составляющие – грубую, аппроксимирующую (низкочастотную) и уточненную, детализирующую (высокочастотную) – с последующим их дроблением с целью изменения уровня декомпозиции сигнала. Это возможно как во временной, так и в частотной областях [70]. При каждом шаге декомпозиции происходит изменение разрешающей способности и изменение размеров базиса в два раза. В результате сигнал оказывается представленным в виде набора коэффициентов на разных уровнях декомпозиции. На практике часть из них может иметь малую величину, что позволяет ими пренебречь и аппроксимировать исходный сигнал значительно меньшим числом параметров, чем число исходных отсчетов (сжатие изображения).

Дискретное вейвлет-преобразование сигнала  $s(t)$ , заданное дискретными значениями  $a$  и  $b$  на некотором множестве  $Z$ , равными  $a=2^j$ ,  $b=k2^j$ , представляет его в виде коэффициентов

$$d_j(b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sqrt{2^{-j}} \psi\left(\frac{t-b}{2^j}\right) dt ;$$

$$c_J(b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sqrt{2^{-J}} \varphi\left(\frac{t-b}{2^J}\right) dt , \tag{7.31}$$

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

где  $\psi(t)$  – вейвлет-функция (*psi*-функция) с нулевым значением интеграла ( $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ ), определяющая детали сигнала;  $\varphi(t)$  – масштабирующая или скей-

линг-функция (*scaling*) с единичным значением интеграла ( $\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 1$ ), опреде-

ляющая грубое приближение (аппроксимацию) и порождающая коэффициенты аппроксимации  $j$ ;  $J=1, 2, \dots$  – октавный индекс уровня декомпозиции. Базисная *psi*-функция (тип ортогонального вейвлета) обеспечивает выполнение двух основных операций в области ее определения  $R$ :

смещение по оси времени  $t$

$$\varphi_0(t-b), \text{ где } b \in R;$$

масштабирование

$$a^{-1/2} \varphi_0\left(\frac{t}{a}\right) \text{ при } a > 0 \text{ и } b \in R.$$

Параметр  $a$  задает ширину пакета, а  $b$  – его положение. Таким образом, выполняется соотношение на одном шаге декомпозиции

$$\psi(t) = a^{-1/2} \varphi_0\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (7.32)$$

Обратное нормированное дискретное вейвлет-преобразование (ОДВП), используемое в MATLAB пакете, выполняется по формуле

$$s(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} d(j, k) a_0^{-j/2} \varphi_{j, k}(a_0^{-j} t - k). \quad (7.33)$$

Технология вейвлет-обработки РЛИ основана на представлении пространства сигналов  $V$  в виде системы вложенных подпространств  $V_j$ , отличающихся друг от друга только перемасштабированием независимой переменной. Основанный на этом метод называется *методом кратномасштабным анализом* (multiresolution analysis) (КМА).

Кратномасштабное представление сигналов изображений означает их преобразование в последовательность образов с разной степенью детализации. Для грубых (сглаженных) образов служит функция  $\varphi(t)$ , а уточнение достигается с помощью вейвлет-коэффициентов. Наиболее часто используют серию ортогональных вейвлетов Добеши и реализуют пакетную обработку согласно «дереву» алгоритма Малла (Mallat) или его усовершенствований, показанных на рис. 7.11, а, б. На каждом шаге выполняется операция «расщепления сигнала» на НЧ- и ВЧ-составляющие и формируется два децимированных НЧ- и ВЧ-массива. Граница разделения равна половине максимальной частоты дискретизации. Для следующего шага используют НЧ-часть (в алгоритме Малла). В усовершенствованном алгоритме операция «расщепления» (splitting) применяется и для любой из ВЧ-компонент.

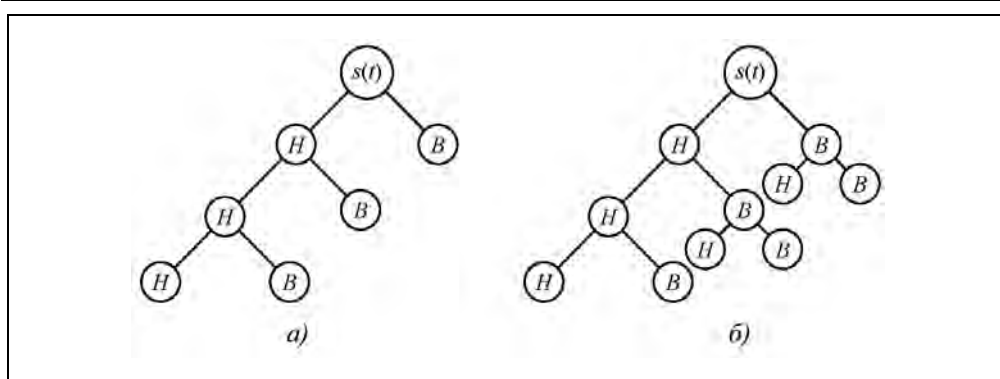


Рис. 7.11. Дерево алгоритма Малла:  
*a* – исходный алгоритм, *б* – усовершенствованный алгоритм

На рис. 7.12 приведены примеры разложения по вейвлет-базисам строки тестового изображения с моделями откликов от точечных, групповых и протяженных объектов (без спекл-шума). Используются процедуры MATLAB для шага декомпозиции (см. help dwt в командном окне MATLAB):

$[ca1,cd1]=dwt(Lin,'db1')$ ; – первый шаг декомпозиции, где  $Lin$  – входная строка, 'db1' – имя вейвлета (Дебеша),  $ca1, cd1$  – НЧ- и ВЧ- выходные компоненты;

$[ca2,cd2]=dwt(ca1,'db1')$ ; – второй шаг, расщепление первой НЧ-компоненты и  $[cda2,cdd2]=dwt(cd1,'db1')$ ; – расщепление первой ВЧ-компоненты.

Для обратного перехода к массивам исходной размерности применяют процедуры ОДВП:

$a0=idwt(ca1,ch1,'db1',size(Lin))$ ; – ОДВП по первой декомпозиции (восстановление исходного сигнала);

$a00=idwt(ca1,ch1*0,'db1',size(Lin))$ ; – ОДВП только по НЧ-составляющей. Фактически это масштабирование половинной строки к исходному размеру массива, т.е. результат НЧ-фильтрации исходного массива.

При восстановлении декомпозиции нескольких уровней последовательно по приведенным выше формулам вычисляют каждый предыдущий уровень, обнуляя при необходимости ненужные (например, ВЧ) компоненты. Характерно существенное различие в исходном процессе и процессах, восстановленных по НЧ-компоненте, когда длительность отметки меньше длительности вейвлет-отклика соответствующего уровня (сравнить рис. 7.12, *з-е*). Это свойство может служить признаком для адаптации алгоритмов фильтрации РЛИ к размерам неоднородности.

Рассмотрим алгоритм двумерного пакетного вейвлет-разложения и реконструкции изображений. Сначала изображение построчно раскладывается на коэффициенты скейлинг-функций и вейвлет-коэффициенты (на рис. 7.13 они обозначены как  $S$  и  $W$ ), а затем с полученным набором коэффициентов по вертикали производится аналогичная процедура. В итоге формируются четыре компоненты размерностью  $1/2 \times 1/2$  от исходной матрицы изображения, показанные на рис. 7.13.

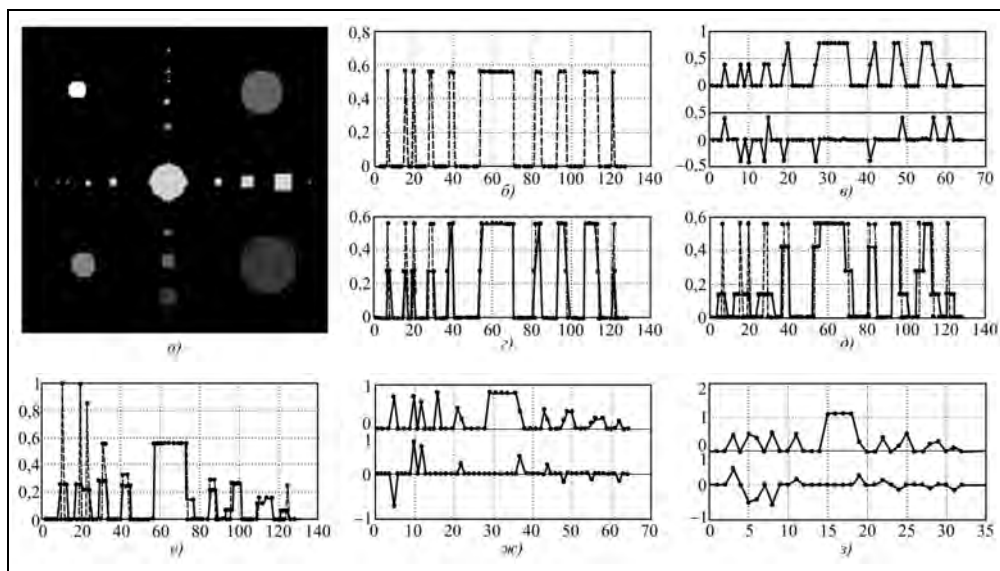


Рис. 7.12. Декомпозиция и восстановление одномерного сигнала вейвлетом Дебеша:

*a* – двумерное тест изображение; *б* – горизонтальное сечение теста по середине; *в* – первый шаг декомпозиции, компоненты НЧ (верх) и ВЧ (низ); *г* – восстановление исходного сигнала (пунктир) и только НЧ-компоненты (сплошные линии); *д* – восстановление исходного сигнала по декомпозиции первого и второго уровней (пунктир) и только НЧ-компоненты (сплошные линии); *е* – восстановление исходного сигнала по декомпозиции первого и второго уровней для сечения теста по вертикали (пунктир) и только НЧ компоненты (сплошные линии); *ж* – первый шаг декомпозиции, компоненты НЧ (верх) и ВЧ (низ); *з* – второй шаг декомпозиции, компоненты НЧ (верх) и ВЧ (низ)

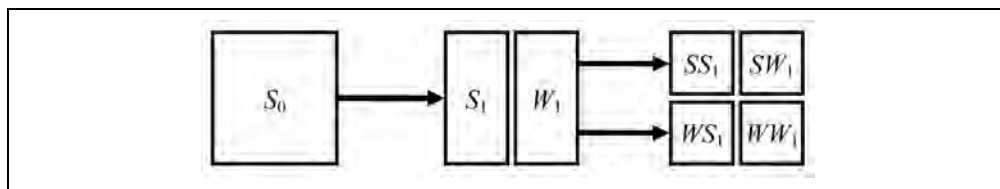


Рис. 7.13. Схема вейвлет-декомпозиции двумерного изображения

Далее компонента с коэффициентами только скейлинг-функций ( $SS_1$ ) подвергается дальнейшему разложению по аналогичной процедуре до необходимой глубины разложения.

Процесс декомпозиции двумерного изображения показан на рис. 7.14. В качестве исходного изображения на рис. 7.14,а взят результат восстановления декомпозиции первого уровня (рис. 7.12,а и 7.14,а идентичны). Использована процедура MATLAB:  $[ca1, ch1, cv1, cd1] = \text{dwt2}(AS, 'db1')$ , где в квадратных скобках компоненты декомпозиции,  $AS$  – входное изображение. Для восстановления изображения используют процедуру, в которой в общем случае фильтрации компоненты умножают на коэффициенты  $k1, k2, k3, k4$ :  $A0 = \text{idwt2}(ca1 \cdot k1, ch1 \cdot k2, cv1 \cdot k3, cd1 \cdot k4, 'db1', \text{size}(AS))$ . Аналогичную формулу применяют для преобразования компонент в более высокий уровень.

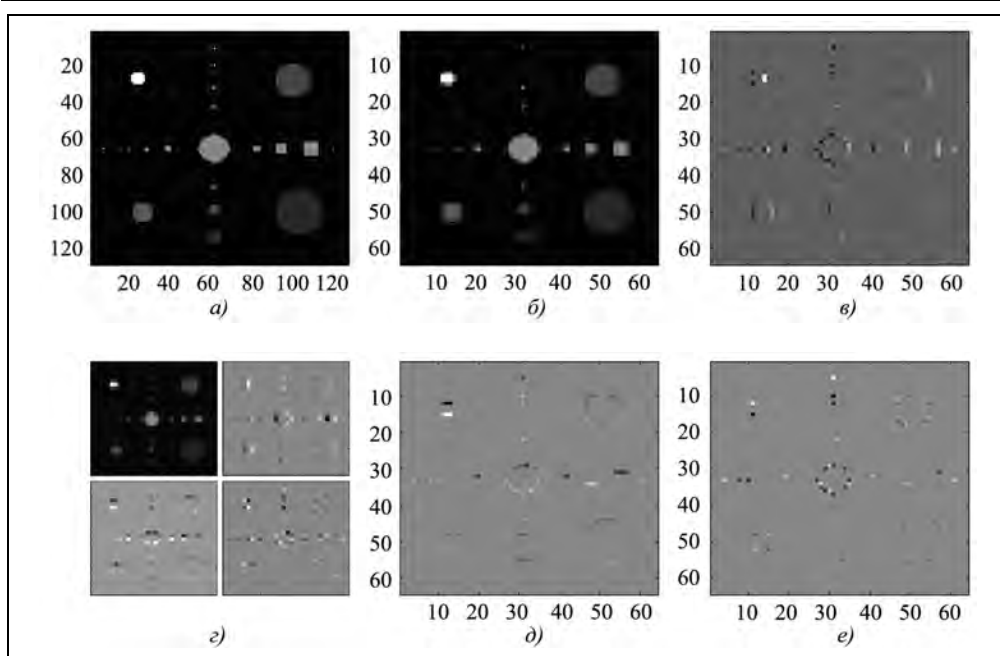


Рис. 7.14. Двумерная декомпозиция и восстановление изображения:

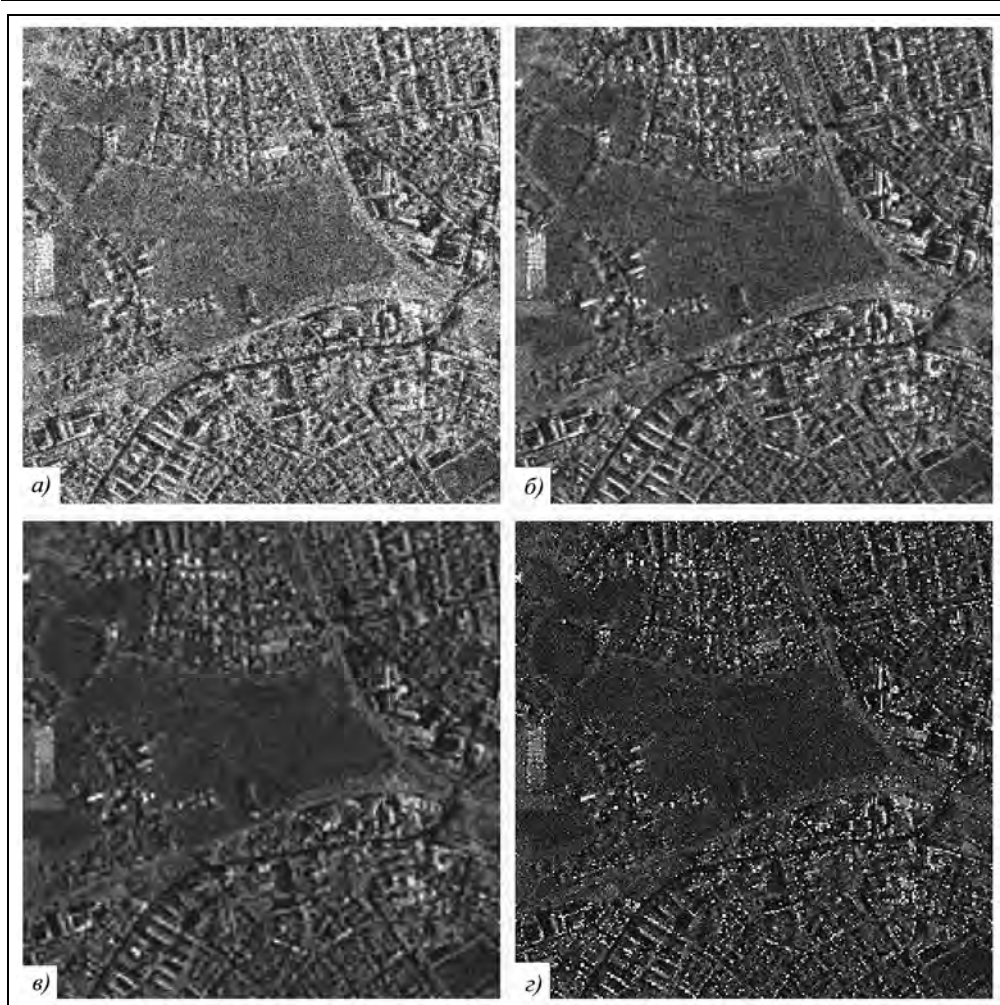
$a$  – двумерное тест-изображение;  $b, c, d, e$  – компоненты декомпозиции первого уровня;  $b$  –  $SS_1$  (НЧ–НЧ, скейлинг-функции);  $c$  –  $WS_1$  (ВЧ–НЧ);  $d$  –  $SW_1$  (НЧ–ВЧ);  $e$  –  $WW_1$  (ВЧ–ВЧ);  $f, g, h$  – компоненты декомпозиции второго уровня  $SS_2, WS_2, SW_2, WW_2$

Для некогерентной обработки РЛИ можно воспользоваться процедурой MATLAB `wdencmp` с использованием вейвлет-функций

```
xd1=wdencmp('gbl',LS,'db1',2,thr,sorh,keepapp).
```

Процедура формирует выходное изображение ХС от входного изображения (или одномерного сигнала) в вариантах сжатия объема или фильтрации аддитивного шума. Для фильтрации спекл-шума в РЛИ оно должно быть предварительно прологарифмировано. Используется положительная глобальная функция порога  $thr=0,7824$ . Строка 'wname' – имя заданного вейвлета (использован 'db1'). Параметры  $N=1$  и  $N=2$  – используемые уровни декомпозиции входного сигнала,  $sorh$  – тип порога,  $sorh='s'$  – мягкий ('h' – жесткий),  $keepapp=1$ , означающий, что коэффициенты аппроксимации могут не ограничиваться. Результаты фильтрации РЛИ для  $N=1$  и  $N=2$  приведены на рис. 7.15,б,в.

Фильтрация РЛИ, приведенная на рис. 7.15,б,в, выполнена при постоянном значении порога подавления высокочастотных компонент. В отличие от них, при использовании динамического порога, выключающего фильтрацию ВЧ-отметок при их значении, превышающем  $3\sigma$  шума, происходит подчеркивание ярких точечных отметок, как это видно на рис. 7.15,г.



**Рис. 7.15.** Фильтрация РЛИ с использованием вейвлет-преобразований:  
*a* – исходное РЛИ, одно наблюдение, разрешение  $\sim 2$  м; *б* – фильтрация  $wdencomp$ ,  $N=1$ ,  $ENL=7$ ;  
*в* –  $N=2$ ,  $ENL=27$ ; *г* – фильтрация  $dwt$ ,  $ENL=7,5$

### 7.1.5. Метод нелокального усреднения спекл-шума

Новое направление развития методов фильтрации спекл-шум является обобщением рассмотренных локальных методов, позволяющим учитывать семантические признаки, содержащиеся в изображении. Метод нелокального усреднения (NLM – Non-Local Means) используют для коррекции фотоснимков, телевизионных изображений, материалов медицинских анализов, а также радиолокационных изображений [269, 547]. В отличие от локальных методов фильтрации, усредняющих РЛИ в пределах окна  $A$ , он проводит совместную обработку блока РЛИ в окрестностях данного пикселя  $x$  и близких к нему по структуре парных блоков  $y$  из фрагмента РЛИ

$$NLz(x) = \frac{1}{C(x)} \sum_{y \in A} w(x, y)z(y), \quad (7.34)$$

где  $NLz(x)$  – результат фильтрации в пикселе  $x$ , равный взвешенной сумме пикселей блока  $z(y)$ , ближайшего по структуре, найденного во фрагменте РЛИ;  $w(x, y)$  – весовая функция;  $C = \sum_{y \in A} w(x, y)$  – сумма коэффициентов  $w(x, y)$ . Весовую функцию

для аддитивного гауссова шума рассчитывают через евклидово расстояние между векторами (матрицами) значений пикселей в блоках  $x$  и  $y$ :

$$w(x, y) = \exp\left\{-\|\mathbf{z}(x) - \mathbf{z}(y)\|^2 / h^2\right\}, \quad (7.35)$$

где  $h=12\sigma$  – параметр сглаживания; символ  $\|\cdot\|^2$  означает сумму квадратов разностей значений соответствующих пикселей в блоках  $x$  и  $y$ .

Для спекл-шума, имеющего мультипликативный характер, может потребоваться предварительное логарифмирование отсчетов.

Основные принципы метода базируются на предположении о наличии идеального РЛИ  $z_0(x)$  без шумов и аддитивного шума с неизвестными параметрами  $z_n(x)$ . Производится сравнение предъявленного зашумленного РЛИ  $z(x)=z_0(x)+z_n(x)$  с результатами фильтрации  $NLz(x)$  и оценкой исключенного шума  $\hat{z}_n(x) = z(x) - NLz(x)$ . Задача фильтрации состоит в том, чтобы правильно определить отсчеты шума по блоку с учетом того, что структура сигнала в блоке может быть неоднородна – включать компактные групповые цели, линейные объекты и границы участков с разной УЭПР, которые имеют произвольную ориентацию относительно осей координат снимка.

Для выделения аномалий от однородного шума на первом этапе выполняют серию операций линейной и нелинейной локальной обработки (медианную, анизотропную фильтрацию, выделение контуров, углов, пороговую обработку) и формируют вектор признаков, характеризующих структуру изображения в каждом блоке. По-существу, решается задача распознавания типа аномалии, в ходе которой формируется библиотека признаков для данного РЛИ, с которой сравнивают вектор признаков текущего блока для поиска близких ему по структуре блоков во всем фрагменте РЛИ с последующим усреднением шумов по общему массиву данных в выбранных блоках.

В приведенных примерах фильтрации фотоизображений [269] выбирались размеры блока (окна)  $15 \times 15$  или  $21 \times 21$  пикселей и массив блоков, размерностью  $7 \times 7$ . Для оптимизации поиска ближайших соседей возможно применение Байесова критерия. Благодаря многократному увеличению усредняемой площади пропорционально числу однородных блоков значение  $ENL$  возрастает в несколько раз. Одним из критериев качества фильтрации служит близость исключенного шума  $\hat{z}_n(x)$  к белому шуму (с учетом полосы частотной характеристики сквозного тракта РСА. Неравномерность его спектра (например, подъем высоких частот) может

свидетельствовать о потере разрешения в выходном РЛИ, а низкочастотные составляющие – о появлении артефактов на РЛИ.

Метод нелокального усреднения, позволяя значительно улучшить изобразительные свойства снимков, требует значительных вычислительных затрат. Возможна его модификация, например, путем расчета весовой функции не для каждого пикселя РЛИ, а на разреженной решетке блоков.

В дополнение к рассмотренным алгоритмам фильтрации спекл-шума следует отметить перспективность методов автоматического сегментирования РЛИ по признакам однородности статистических характеристик фрагментов РЛИ на основе нейросетевых подходов (см. гл. 9). В целом, учитывая возрастание потоков данных, возросшие требования по точности измерения отражающих свойств наблюдаемой местности и объектов, а также необходимость внедрения методов автоматической обработки радиолокационной информации, задача оптимизации алгоритмов фильтрации РЛИ остается актуальной.

## **7.2. Регистрация радиолокационной информации**

### **7.2.1. Требования к регистрации радиоголограммы**

Задача регистрации радиолокационной информации состоит в обеспечении длительного хранения полученных материалов радиолокационной съемки для возможности их использования в любых областях, где они могут потребоваться. Современные средства хранения цифровых данных имеют достаточно высокую емкость (гигабайты и десятки гигабайт на единицу носителя) при относительно низкой стоимости по сравнению со стоимостью получения информационного продукта и не должны быть ограничивающим фактором, вызывающим невосполнимые потери информации. Вопросы формирования банка радиолокационных данных, организации оперативного доступа к ним и сохранности информации являются предметом специальных исследований. Решение этих важных проблем выходит за рамки настоящей монографии. Ниже рассмотрены технические характеристики радиолокационных информационных продуктов, необходимая точность их фиксации, форматы хранимых данных.

Регистрации подлежат первичные данные – радиоголограмма и продукты синтеза изображения. Для записи радиоголограмм целесообразно использовать два формата:

1) «как есть» – с выхода радиолинии передачи данных с искажающими аппаратурными воздействиями (нелинейностью, сжатием потока сигналов), но после восстановления дефектов передачи сигналов по радиолинии (пропуска строк, нарушений синхронизации и т.д.);

2) формат, поступающий на синтез РЛИ после коррекции аппаратурных искажений с нормализацией уровня сигналов и восстановлением динамического диапазона сигналов, подвергнутых сжатию на борту КА. Такой формат радиоголограммы, непосредственно пригодный для синтеза РЛИ, а также для распространения заинтересованным потребителям, иногда называют «компьютерным форматом». Естественно, файл радиолокационных данных должен сопровождаться фай-

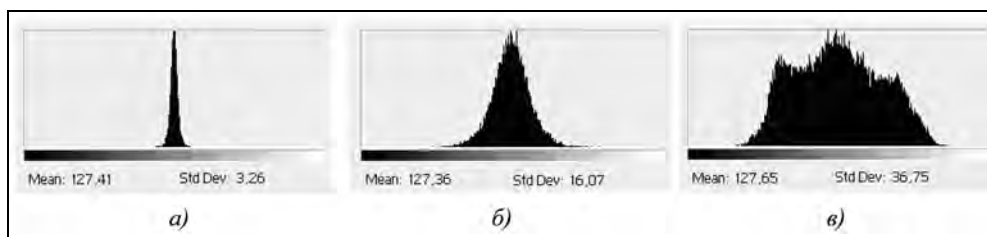


лами служебной информации с параметрами режимов съемки, баллистическими данными движения КА и др.

Форматы радиоголограммы с выхода приемного канала радиолинии передачи данных индивидуальны для каждой аппаратуры РСА. Запись этих сигналов имеет страховочный характер, а также служит для специальной обработки поврежденных мест, если возникает надобность в восстановлении информации при чрезвычайных ситуациях. Для представления радиоголограммы в компьютерном формате, обычно, достаточно 8 бит на отсчет по каждой, действительной и мнимой составляющих сигнала (целое со знаком `int8` или без знака `uint8` с введением опорного уровня 128 ед.). В случаях, когда на предварительной стадии коррекции аппаратурных искажений производится умножение на коэффициенты, мало отличающиеся от единицы (коррекция усиления в приемном тракте или рассогласования параметров АЦП в квадратурных каналах), может потребоваться уменьшение шага квантования шумов и слабых сигналов от одиночных целей, что приведет к необходимости перехода на 16-битовый формат (целое со знаком `int16` или без знака `uint16`). Указанные проблемы исчезают при работе в плавающей арифметике, но это приводит к удвоению объема данных.

В качестве иллюстрации приведем параметры радиоголограммы РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1». Использовались пятиразрядные АЦП, но установленный высокий уровень сигналов на их входе – СКО шумов, равное 5 единиц младшего разряда (ЕМР), приводил к ограничению сильных сигналов от местности. Рекомендуемое значение СКО шумов, равное 1,5 ЕМР, реализовать не удалось по техническим причинам, так как выход приемника был оптимизирован для оптического синтеза РЛИ [208\*].

Для устранения нелинейности была использована специальная процедура коррекции голограммы (см. раздел 11.6). После этого радиоголограмма преобразовывалась в однобайтовый формат (`uint8`). Примеры гистограмм откорректированных радиоголограмм на входе процессора синтеза РЛИ приведены на рис. 7.16 для шумов приемника, взволнованной морской поверхности и суши. СКО шумов составляет ~3,26 ЕМР, полный размах сигнала от местности не превышает 180 ЕМР при допустимом размахе 256 ЕМР.



**Рис. 7.16.** Гистограммы радиоголограммы РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»:

а – шумы приемника; б – взволнованная морская поверхность, скорость приводного ветра 5...8 м/с [63\*], угол падения 41°,  $\sigma^0$  – около минус 20 дБ; в – застроенная прибрежная территория, гористая местность, вулкан (S-диапазон волн, поляризация ГГ, чувствительность  $\sigma_{не}^0 = -30$  дБ; Тихий океан, остров Осима, Япония, виток 2024в, 05.08.1991 (см. РЛИ рис. 7.17))

Таким образом, для параметров РСА «Меч-КУ» представление радиоголограммы в однобайтовом формате имеет запас по линейности амплитудной характеристики, не превышающий 9 дБ (6 дБ на возможность снижения СКО шума до 1,5 ЕМР и 3 дБ на увеличение отношения сигнал/шум по местности с интенсивным отражением). Одно из направлений развития космических РСА связано с применением зондирования в более длинноволновых диапазонах волн ( $L$  и  $P$ ), где контрасты сигналов выше, и требуется более высокая чувствительность РСА. Учитывая это, для регистрации радиоголограммы с целью ввода ее в процессоры синтеза, архивирования и распространения пользователям целесообразно применение двухбайтовых форматов (int16 или uint16).

### 7.2.2. Динамический диапазон выходных радиолокационных изображений

Рассмотрим характеристики выходного информационного продукта, полученного в результате синтеза радиолокационного изображения, а также его некогерентного накопления. Особое место занимают комплексные изображения, применяемые для интерферометрической обработки. Действительные (продетектированные) изображения могут поставляться в виде отсчетов амплитуды (АРЛИ) или мощности (ЭРЛИ), а также – в логарифмическом формате в виде отсчетов удельной эффективной поверхности рассеяния, в децибелах (будем обозначать их как ЛРЛИ). Для регистрации изображений используют целые форматы – однобайтовый (uint8) и двухбайтовый (uint16), а также плавающий формат (float). Совмещенные материалы, являющиеся сочетанием поляриметрических РЛИ, регистрируют в виде многослойных цветных изображений (RGB). Часть материалов используют как справочные для их визуального восприятия при поиске фрагментов РЛИ, подлежащих инструментальной обработке. К таким материалам не предъявляют требований по точности передачи радиометрической информации. Задачей анализа будет рассмотрение материалов, предназначенных для сохранения полной неискаженной информации об объектах, полученной по результатам радиолокационной съемки.

Измерительные свойства РЛИ характеризуются точностями геометрического построения РЛИ и его радиометрических характеристик. Вопросы геометрической точности РЛИ не связаны с форматами представления данных. Точность радиометрических измерений, обеспеченная процедурами радиометрической калибровки (см. гл. 11), может быть нарушена при несоответствии форматов регистрации данных информационным характеристикам РЛИ.

Наиболее существенными факторами радиометрических искажений является ограничение динамического диапазона сигналов при регистрации РЛИ, а также влияние шумов приемника и изменений реальной чувствительности РСА при съемке на разных дальностях и влиянии формы ДНА при отклонениях линии визирования от направления максимума ДНА.

Динамический диапазон сигналов, зарегистрированных на РЛИ, зависит от пространственного разрешения РЛИ, а также от сглаживания РЛИ при некогерентном накоплении. Рассмотрим РЛИ с одним наблюдением без накопления. В этом

### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

случае выходное АРЛИ на участках регистрации шумов приемника или однородной протяженной поверхности будет распределено по закону Рэлея с разными значениями среднего и СКО флуктуаций, которые будут пропорциональны квадратному корню из чувствительности РСА  $\sqrt{\sigma_{\text{не}}^0}$  или суммы сигма нулевого шумового эквивалента и УЭПР наблюдаемой местности  $\sqrt{\sigma_{\text{не}}^0 + \sigma^0}$ . Флуктуации для ЭРЛИ с одним наблюдением подчиняются экспоненциальному закону, частному случаю  $\chi^2$ -распределения, для которого СКО численно равно среднему значению отсчетов ЭРЛИ.

Предварительно оценим динамический диапазон сигналов через отношение максимальной мощности отметок от целей к средней мощности шума. Измеренные экспериментальные данные для разных сюжетов съемки и параметров РСА сведены в табл. 7.2. Групповыми объектами обозначены суда, самолеты, элементы инженерных конструкций (мостов, зданий и др.). Такие яркие объекты встречаются во многих сценах, но с разной вероятностью. Через дробь указаны значения требуемого динамического диапазона регистратора (на 20 дБ больше) для возможности обнаружения слабых контрастов распределенных объектов (см. ниже)

**Таблица 7.2. Отношение сигнал/шум для разных объектов съемки и параметров РСА**

Тип и параметры РСА	Отношение максимальной мощности целей к средней мощности шума / динамический диапазон регистрации РЛИ, дБ		
	Объекты съемки		
	групповые объекты	город	сельская местность
Космический РСА «Меч-КУ», S-диапазон, разрешение ~12 м	50 / 70	50 / 70	39 / 59
Космический РСА TerraSAR-X, X-диапазон:	разрешение ~1,5 м	60 / 80	39 / 59
	разрешение ~5 м	45 / 65	32 / 32
	разрешение ~12 м	35 / 55	16 / 36

Пример РЛИ с разнообразием объектов приведен на рис. 7.17. Характерно наличие на морской поверхности изображений кильватерных следов, создаваемых движением судов. Подобные образования (включая структуру волнения, поверхностные проявления внутренних волн, модуляцию ряби поверхностно активными пленками) имеют низкий контраст на РЛИ по отношению к уровню шумов приемника и слабого отражения от моря. Для их обнаружения требуется высокое радио-

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

метрическое разрешение, которое достигается некогерентным накоплением по площади этого образования (аномалии).

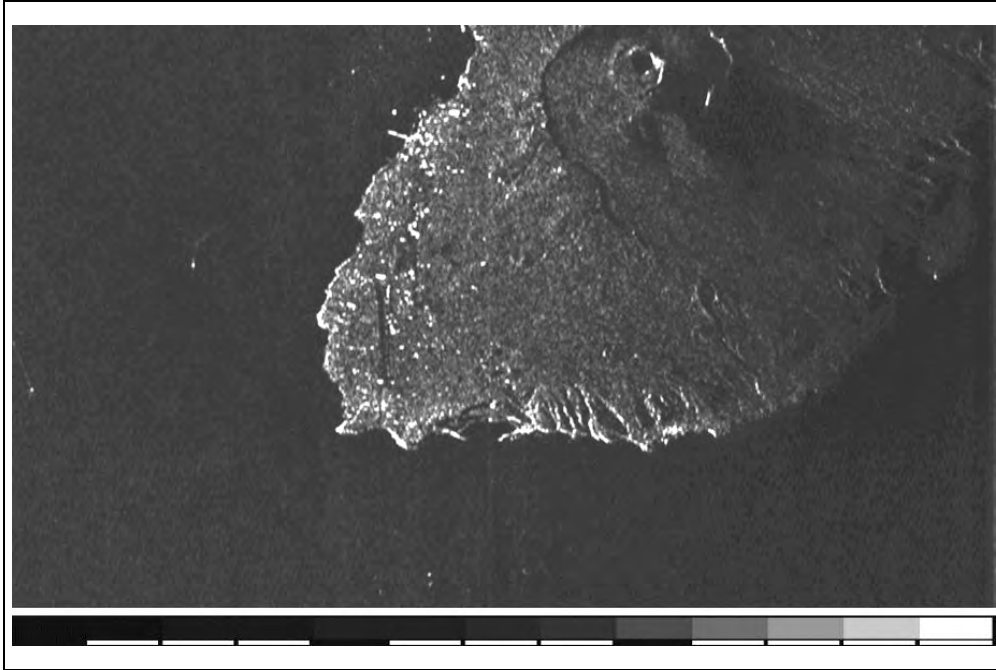


Рис. 7.17. Фрагмент РЛИ о. Осима, Япония с окружающей надводной обстановкой (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1». Виток 2024в)

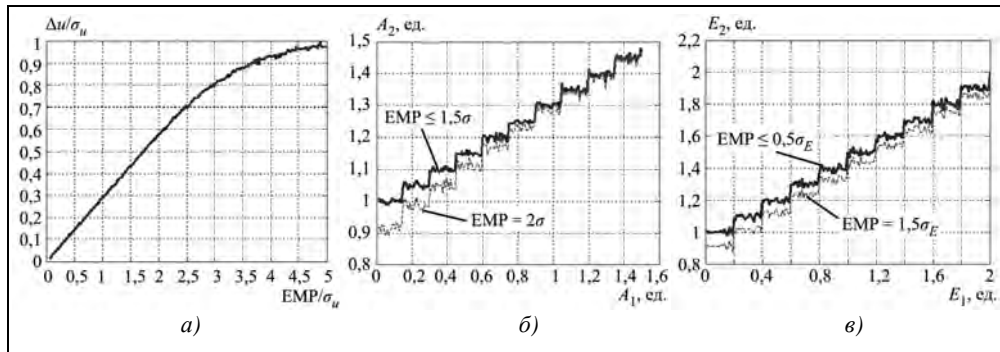
При регистрации РЛИ в целых форматах необходимо, чтобы единица младшего разряда (EMР) дискретизации сигнала была достаточно малой по сравнению с СКО флуктуаций шумов приемника. Как известно, ошибки квантования распределены по равномерному закону, СКО ошибок квантования равно

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 &= \text{std}\{\Delta u\}^2 = \\ &= \int_{-EMR/2}^{EMR/2} \Delta u^2 p(\Delta u) du = \frac{\Delta u^3}{3EMR} \Bigg|_{u=-EMR/2}^{EMR/2} = \{0,28867EMR\}^2, \end{aligned} \quad (7.36)$$

где  $p(\Delta u) = \frac{1}{EMR}$  при  $|\Delta u| \leq \frac{EMR}{2}$  – плотность вероятности равномерного закона распределения ошибок.

На рис. 7.18 приведены графики, характеризующие ошибки дискретного представления случайных процессов – составляющих комплексного РЛИ (гауссово распределение), амплитудных РЛИ (рэлеевское распределение) и энергетических РЛИ (экспоненциальное распределение).

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**



**Рис. 7.18.** Графики ошибок дискретизации шумов приемника:

*a* – составляющие КРЛИ (гауссово распределение); *б* – амплитудное РЛИ (рэлеевское распределение);  
*в* – энергетическое РЛИ (экспоненциальное распределение)

Особенность получаемых РЛИ состоит в том, что выходной сигнал пропорционален суммарному процессу сигнал+шум. Отношение сигнал/шум для сигнала от некоторой поверхности зависит от наклонной дальности съемки (от кадра к кадру, по формуле дальности), а также от формы ДНА по углу места (в пределах одного кадра). При перенацеливании полосы съемки выбирают один из вариантов: сохраняют одно и то же значение средней излучаемой мощности или для экономии энергопотребления изменяют среднюю мощность излучения, регулируя скважность. В любом случае, регулируя усиление приемника, добиваются согласования выхода приемника со входом АЦП, но во втором случае отношение сигнал/шум в выходном РЛИ сохраняется постоянным, а в первом случае меняется от кадра к кадру. В сопроводительной информации к снимку обычно прилагают таблицу зависимости мощности шумов от дальности, по которой можно откалибровать выходное РЛИ в единицах УЭПР (или ЭПР) отражающей способности наблюдаемой местности или объектов (см. гл. 11). Для калибровочных операций погрешность оценки мощности шума на РЛИ не должна превышать 0,25...0,5 дБ ( $\Delta u/\sigma_u \sim 0,03...0,06$ ). Соответственно для регистрации составляющих КРЛИ значение EMP не должно превышать

$$EMP = \frac{\Delta u}{0,28867} \sigma_u = \frac{10^{\Delta_{дБ}/20} - 1}{0,28867} \sigma_u = (0,1...0,2) \sigma_u. \quad (7.37)$$

Это означает, что требуемый динамический диапазон при регистрации составляющих КРЛИ должен превышать цифры, приведенные в табл. 7.2 для отношения максимального уровня сигнала к средней мощности шума, на 14...20 дБ. При регистрации АРЛИ ошибки дискретизации имеют то же значение, определяемое формулой (7.37) с аналогичными требованиями к динамическому диапазону, как для регистрации составляющих КРЛИ. Однако в задачах обнаружения слабых контрастов на РЛИ по площадным объектам требования к уменьшению EMP могут быть ослаблены. Как показывают графики, приведенные на рис. 7.18,б,в, погрешности оценки среднего значения суммарного процесса шум+фон пренебрежимо малы (менее 0,07 дБ), если  $EMP \leq 1,5 \text{mean}\{A\}$ .

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Аналогичная ситуация имеет место для ЭРЛИ, но требования к величине ЕМР более жесткие. Малый уровень погрешностей оценки средней мощности суммарного процесса шум+фон (менее 0,09 дБ) достигается при  $EMR \leq 0,5 \text{mean}\{E\}$ .

Резюмируя приведенные соображения, можно сделать вывод, что для регистрации РЛИ среднего разрешения (5...10 м) достаточно динамического диапазона 65...70 дБ, а для РСА с метровым разрешением требуется 80 дБ.

### 7.2.3. Параметры регистрации радиолокационных изображений

Из используемых форматов представления радиолокационных данных только плавающий формат практически не имеет ограничений по динамическому диапазону передаваемых сигналов и при этом обеспечивает достаточную точность передачи данных. Параметры целых форматов – 8- или 16-битового приведены в табл. 7.3. Учитывается, что для 8-битового формата без знака (uint8) имеем 256 значений сигнала от 0 до 255, а для формата со знаком (int8) – от минус 128 до 127. Для 16-битового формата без знака (uint16) имеем 65536 значений сигнала от 0 до 65535, а для формата со знаком (int16) – от минус 32768 до 32767. Порядок возрастания значений битов отсчетов амплитуды при регистрации ее в виде \*.tif-файлов (включая формат GeoTIFF с координатной поддержкой по GPS в отдельном «слое») может быть совпадающий с используемым в IBM PC и в среде MATLAB или же обратный, как в среде Macintosh. Преобразование из одного порядка в другой может быть выполнено с помощью программ Photoshop, MATLAB или с помощью специализированных пакетов, предназначенных для работы с РЛИ.

**Таблица 7.3. Информационные возможности целых форматов регистрации РЛИ**

Параметр	Динамический диапазон, дБ		Примечание
	8-битовый	16-битовый	
Амплитудное РЛИ	48	96	uint8 или uint16
Энергетическое РЛИ	24	48	uint8 или uint16
Составляющие комплексного РЛИ	42	90	int8 или int16
	Дискретность передачи фазы, град		
Фазовое РЛИ	1,4	$5,5 \cdot 10^{-3}$	int8 или int16
	Дискретность передачи мощности, дБ		
Логарифмическое (децибельное) РЛИ	0,31	$10^{-14}$	uint8 или uint16 относительно опорного уровня

Реализуемые динамические диапазоны для регистрации АРЛИ и ЭРЛИ определяются числом отсчетов в формате. При оценке параметров логарифмического (децибельного) формата будем исходить из требования передачи полного динамического диапазона сигналов 80 дБ.

Передачу комплексных РЛИ обычно реализуют двумя квадратурными составляющими – действительной и мнимой. Удобным форматом для обработки комплексных РЛИ и использования их для моделирования процессов преобразования сигналов в РСА является представление КРЛИ в виде амплитудного РЛИ – АРЛИ

и сопровождающего его фазового РЛИ – ФРЛИ. Этот формат также представлен в таблице. Форматы со знаком можно заменить на форматы без знака, прибавив опорный уровень 128 (для uint8) или 32768 (uint16), что даст дополнительные удобства регистрации файлов в форматах RAW или GeoTIFF с просмотром их с помощью программы Photoshop.

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о пригодности 16-битового формата для передачи АРЛИ, ФРЛИ и составляющих КРЛИ. Для передачи энергетического РЛИ, полученного, например, в результате некогерентного накопления, 16-битовый формат пригоден с ограничениями, для исключения которых ЭРЛИ преобразуют в АРЛИ путем извлечения квадратного корня из отсчетов ЭРЛИ. Следует отметить, что в отдельных случаях возможно появление аномально ярких отметок на РЛИ. Например, при съемке аэродрома со стоянкой пассажирских самолетов класса ИЛ-18 (РСА «Меч-КУ», виток 1038н) было обнаружено, что их ЭПР составляет десятки тысяч квадратных метров, вместо обычных 350...400 м. Такое явление было вызвано бликом отражения от фюзеляжей самолетов, имеющих форму, близкую к цилиндру, при нормальном падении радиоволн. Для исключения искажений регистрируемой радиолокационной информации в алгоритмах обработки РЛИ должен быть предусмотрен контроль уровней выходного сигнала.

Использование 8-битовых целых форматов для регистрации РЛИ, значительно более удобных при работе с изображениями, возможно в случаях, когда не ставится задача радиолокационного портретирования объектов или для общего ознакомления с имеющимися материалами радиолокационной съемки.

Далее изложены материалы по отображению радиолокационной информации, что так или иначе предполагает ее зрительное восприятие. В следующем разделе рассмотрены особенности зрительного восприятия РЛИ, а затем их отображение на мониторе и получение твердой копии РЛИ.

### **7.3. Характеристики зрительного восприятия РЛИ**

Работа с радиолокационными изображениями, полученными в результате синтеза и применения последетекторной фильтрации, предусматривает получение твердых копий РЛИ на бумаге или другом носителе, а также отображение на экране монитора для анализа и дешифрирования РЛИ и их тематической обработки в сочетании с инструментальными методами. Зрительное восприятие и возможности извлечения полезной информации зависят от характеристик зрительного анализатора и параметров носителя РЛИ. При отображении РЛИ на экране монитора имеются широкие возможности для согласования параметров отображаемого РЛИ (яркости, контраста, масштаба, цветовой гаммы, применение пороговых преобразований) с параметрами зрительного анализатора, а также применение процедур, улучшающих изобразительные или дешифровочные свойства изображений перед их фиксацией на твердом носителе.

Несмотря на развитие методов автоматической обработки радиолокационной информации, остается приоритетным визуальное дешифрирование РЛИ с исполь-

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

зованием поддержки средствами и процедурами автоматизации. Это обусловлено сложностью характера наблюдаемой поверхности, разнообразием объектов, требующих выявления и классификации по данным радиолокационной съемки, а также тем фактом, что зрительный анализатор в сочетании с мыслительным аппаратом реализует близкую к оптимальной *пространственную фильтрацию изображений с адаптивным пороговым обнаружением аномалий* на статистически однородном фоне и их классификацией.

Количественные характеристики обнаружения объектов на РЛИ при визуальном дешифрировании определяются яркостью (контрастом) их изображений, минимальным размером пятна на бумаге (простой или предназначенной для регистрации фотографий) или на экране монитора при выборе оптимального масштаба увеличения, а также размеров фрагмента РЛИ, в пределах которого возможна ассоциативная фильтрация с выделением формы объекта (аномалии).

В процессе дешифрирования РЛИ принятие решения о наличии объекта и его классификация реализуются несколькими этапами в зависимости от сложности наблюдаемой фоноцелевой обстановки. Первый этап – это общее дешифрирование – выявление элементов рельефа, гидрографии, дорожной сети, застройки, инженерных сооружений и сегментация изображения с выделением однородных участков для детальной визуальной и инструментальной обработки. Обнаружению объектов предшествует оценка статистики локально однородного участка фона и обнаружение «аномалии» по отношению к нему, выделение объекта (определение его формы) и после этого отнесение объекта к определенному классу – его опознавание.

Количественные соотношения, определяющие связь контрастной чувствительности глаза с параметрами изображения и условиями наблюдения, достаточно сложны и к тому же имеют значительный разброс от оператора к оператору. Поэтому в литературе обычно рассматривают некоторые обобщенные модели зрительного восприятия, отражающие общие закономерности [57, 204]. К ним в первую очередь относится закон Вебера–Фехнера, характеризующий постоянством пороговой контрастной чувствительности при изменении яркости

$$\frac{\Delta B_i}{B} = \frac{B_i - B}{B} = b = \text{const}, \quad (7.38)$$

где  $B_i$  – яркость наблюдаемого объекта;  $B$  – яркость окружающего фона;  $\Delta B$  – приращение яркости;  $b$  – постоянная контрастной чувствительности.

Закон Вебера–Фехнера верен лишь для ограниченного диапазона яркостей. При малых яркостях пороговый контраст резко возрастает. Г.Т. Фехнер и Г.Л. Гельмгольц [57] объясняли это влиянием собственного света сетчатки глаза  $B_0$  и представляли соотношение (7.38) в виде

$$\frac{\Delta B_i}{B + B_0} = b = \text{const}. \quad (7.39)$$

Выражение (7.39) сводится к закону Вебера–Фехнера при большой яркости фона. На практике дешифрирования РЛИ к такому же эффекту приводит рассеянный свет от лица оператора, деталей приборов, используемых при дешифрирова-



нии, а также общее освещение в помещении. Это ухудшает контрастную чувствительность на темных участках изображения.

Значение пороговой чувствительности в общем случае зависит от угловых размеров наблюдаемого объекта (в пределе – пикселя изображения), четкости его контура, абсолютных яркостей объекта и фона. При больших размерах объекта и недефицитной продолжительности наблюдения, нормальных условиях освещенности и резкой границе между объектом и фоном пороговая контрастная чувствительность в среднем равна 0,02. По существу, эта цифра относится к условиям наблюдения фотометрического клина, сопровождающего приведенные в этом и других разделах радиолокационные снимки. При ухудшении условий наблюдения пороговая контрастная чувствительность может возрасти до 0,35 для размытых аэрофотоснимков.

При наблюдении РЛИ с их зернистой структурой, обусловленной спеклшумом, количественная мера различимости объектов по яркости согласно закону Вебера–Фехнера [77, 205] характеризуется величиной ощущения, пропорционально логарифму воздействия (стимулу)

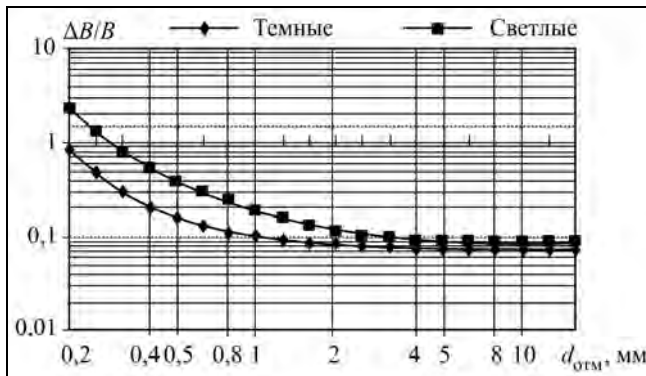
$$S = a \ln B, \quad (7.40)$$

где  $B$  – яркость;  $a$  – константа, зависящая от размеров отметки, резкости границ, характера окружающего фона;  $S$  – величина ощущения. Различаемое приращение радиолокационного контраста вычисляется путем дифференцирования приведенной формулы

$$\frac{\Delta B}{B} = \delta K_{\text{пор}}, \quad (7.41)$$

где  $\delta K_{\text{пор}}$  – пороговое значение обнаруживаемого приращения контраста.

Зависимость порогового контраста от размеров отметки на РЛИ для положи-

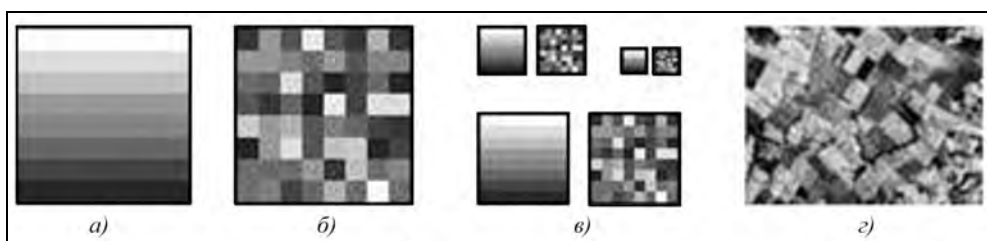


**Рис. 7.19.** Контрастная чувствительность зрительного анализатора для «гладких» изображений в зависимости от диаметра отметки  $d$

тельных и отрицательных контрастов приведена на рис. 7.19. Такая же логарифмическая зависимость обнаружения контраста справедлива и для мощности отраженного сигнала. Однако реальные устройства регистрации РЛИ имеют предел по передаче максимальной яркости (максимальная яркость индикатора, прозрачность фотопленки, отражающая способность фотопечатка РЛИ). Минимальная же яркость определяется не минимальной мощностью отраженного сигнала, а общим освещением помещения или рассеянием света от средней яркости РЛИ. Эти явления влияют на характеристики зрительного анализатора.

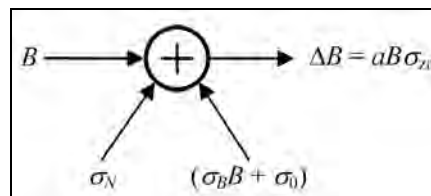
## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Следует иметь в виду, что из-за случайного характера отражения от подстилающей поверхности, как правило, сравниваются яркости, не близко расположенных, а удаленных друг от друга отметок, находящихся в разных элементах разрешения РЛИ. Как это иллюстрирует рис. 7.20, при случайном расположении отметок различие яркостей обнаруживается при значительно большем контрасте между ними. Для проверки правильности восприятия контрастов в подрисуночной подписи указан порядок следования полей в строках (сверху вниз) по возрастанию яркости в условных уровнях 0...F от темных (яркость 37 ед., условный уровень «2») до белых (яркость 255 ед., условный уровень «F»). Для сравнения на рис. 7.20,з приведен фрагмент РЛИ сельскохозяйственных угодий (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»).



**Рис. 7.20.** Изображения градационных мир с разными законами изменения яркостей: *a* – 8 уровней равномерно; *б* – 14 уровней в случайный порядке; *в* – миры *a* и *б* в уменьшенных масштабах (порядок следования полей миры *б*: 395E53A3 99869588 66D52463 5362E4DD C9A58643 29D5BD24 66693B78 7846A7F7); *з* – фрагмент РЛИ

Влияние флуктуаций отражения от подстилающей поверхности – спекл-шума на РЛИ можно оценить, зная законы распределения мощности шума, сигналов от объекта и фона, окружающего объект. Экспериментальные исследования процесса дешифрирования РЛИ привели к формулированию модели зрительного анализатора, позволяющей учесть изменение контрастной чувствительности от СКО флуктуаций яркости и размеров отметок на РЛИ [151\*, 163\*]. В этой модели влияние факторов, вызывающих ограничение контрастного разрешения, выражено в виде составляющих эквивалентного шума, действующего на входе решающего устройства совместно с полезным сигналом (рис. 7.21).



**Рис. 7.21.** Модель зрительного анализатора

Разрешаемое приращение яркости изображения выражается через СКО суммарного «шума зрительного анализатора», образованного несколькими независимыми составляющими

$$\Delta B = aB\sigma_{za} = a\sqrt{(B\sigma_N)^2 + (\sigma_B B + \sigma_0)^2}, \quad (7.42)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий критерий различения;  $\sigma_{za}$  – «шум зрительного анализатора»;  $\sigma_N$  – флуктуации яркости, усредненные по площади отметки от объекта, отнесенные к средней яркости объекта;  $\sigma_B$  – составляющая, определяемая

контрастной чувствительностью для гладкого (без шумов) изображения согласно рис. 7.21;  $\sigma_0$  – составляющая, определяемая рассеянным светом.

Флуктуационная составляющая  $\sigma_N$  определяется внутриэлементным и межэлементным некогерентным накоплением

$$\sigma_N = \frac{a_{za}}{\sqrt{N_e N_s}}, \quad (7.43)$$

где  $N_e$  – число наблюдений в элементе разрешения  $S_e$ ;  $N_s = S_{geom}/S_e$  – число элементов разрешения, приходящихся на площадь объекта.

Таким образом, для разрешаемого контраста на РЛИ имеем выражение

$$\frac{\Delta B}{B} = a_{za} \sqrt{\frac{1}{N_e N_s} + \left( \sigma_B + \frac{\sigma_0}{B} \right)^2}. \quad (7.44)$$

Для типовых условий наблюдения получены численные значения параметров  $a_{za} = 3,16$  (вероятность обнаружения порогового контраста 0,5),  $\sigma_B = 0,05 \dots 0,1$  в зависимости от типа отметки (светлая или темная) и размеров отметки на снимке,  $\sigma_0 = 0,0003$ .

Экспериментальные исследования возможностей зрительного анализатора по усреднению яркости изображения вдоль линий и других фигур произвольной конфигурации (периодических структур и др.) показали, что зрительный анализатор при дешифрировании черно-белых изображений является адаптивным фильтром, реализующим оценку максимального правдоподобия с потерями 4...6 дБ. Отмечено, что при визуальном дешифрировании РЛИ зрительный анализатор обеспечивает подавление спекл-шума, эквивалентное усреднению флуктуаций по площади анализируемого участка (сегмента) сложной конфигурации, если РЛИ предварительно сглажено до трех-четырех наблюдений, при которых рэлеевское распределение амплитуды преобразуется к распределению, приближающемуся к гауссову.

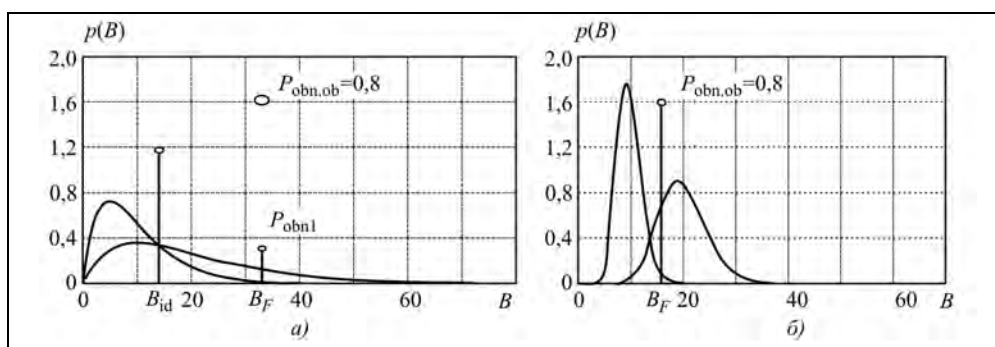
Обнаружительные способности зрительного анализатора можно уподобить работе адаптивного решающего устройства с переменной стратегией, выполняющего следующие операции:

- 1) оценка общей статистики РЛИ;
- 2) выделение на РЛИ укрупненных сегментов (вода, поле, лес, городская застройка);
- 3) обнаружение аномалий по критерию Неймана–Пирсона;
- 4) переход к критерию идеального наблюдателя с равновероятным порогом разделения аномалии и фона;
- 5) идентификация границ сегмента по принадлежности пикселей к фону или аномалии.

Рассмотрим этапы дешифрирования РЛИ при наблюдении поверхностно распределенного объекта типа «лесопосадки» и «поле», поз. 5 и 3 на рис. 7.7 (подраздел 7.1.2) с УЭПР  $\sigma_{les}^0$  и УЭПР  $\sigma_{pole}^0$  (такая ситуация с той или иной степенью приближения может относиться к таким объектам, как самолет на стоянке, корабль в акватории, элементы ландшафта и др.). Пусть отношение УЭПР составляет 3 дБ ( $\sigma_{les}^0 / \sigma_{pole}^0 = 2$ ), а площадь лесопосадок составляет  $N_s = 10$  элементов разрешения РСА.

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Рассмотрим локальную область, окружающую объект. Законы распределения мощности подчиняются хи-квадрат распределению с  $2N_e$  степенями свободы, но различаются по средним значениям и значениями СКО, которые для спекл-шума пропорциональны средним значениям (с поправкой на шумы зрительного анализатора). На рис. 7.22, *a* показаны законы распределения яркости в точке РЛИ для участков «поля» и «леса» в произвольных единицах, например, цифровых отсчетах на выходе РСА (некогерентное накопление в элементе  $N_e = 2$ ).



**Рис. 7.22.** Плотности вероятности обнаружения яркого объекта на равномерном фоне: *a* – двухэтапное обнаружение; *б* – трактовка обнаружения при предварительном сглаживании РЛИ (фильтр на 10 элементов)

Процесс дешифрирования можно приближенно представить себе следующим образом. Первый этап – поиск аномалий в законе распределения яркостей на участке «поля». Оператор «работает» по критерию Неймана–Пирсона при пороге с вероятностью ложной тревоги  $F = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ . Для элемента разрешения «леса» вероятность превышения порога  $P_{obn1} = 0,2$ , однако число таких элементов большое ( $N_s=10$ ) и вероятность того, что хотя бы в одном из них будет превышен порог, достаточно велика

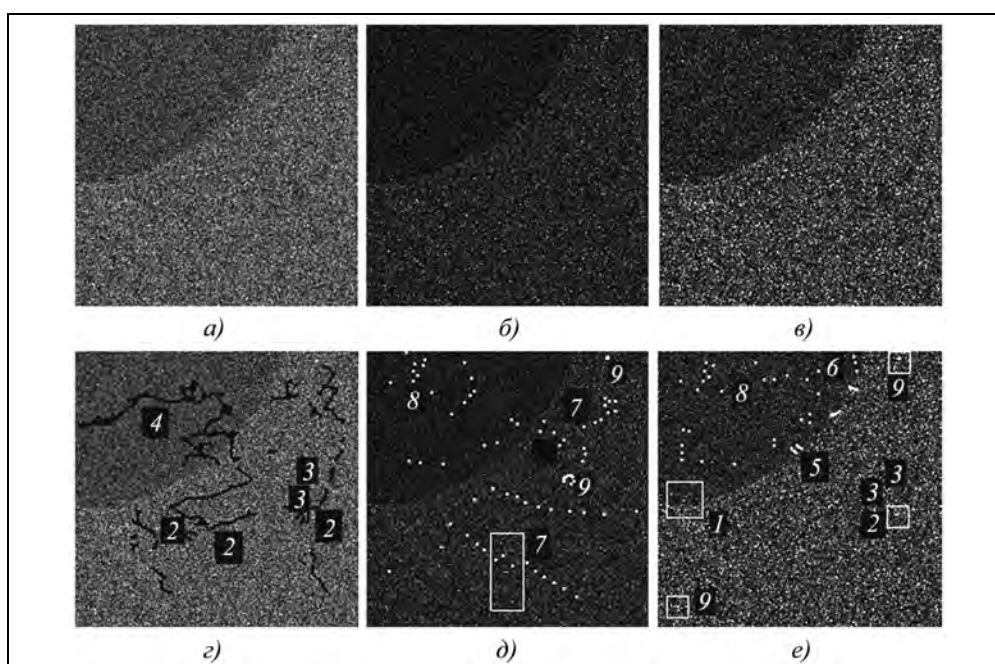
$$P_{N_s} = 1 - (1 - P_{1F})^{N_s} = 0,8. \quad (7.45)$$

Обнаружив одно или несколько превышений отметок над порогом  $B_F$ , вызванных наличием какого-либо объекта, оператор оценивает параметры распределения для аномалии и на втором этапе изменяет значение порога для того, чтобы наилучшим образом (по критерию идеального наблюдателя с порогом  $B_{id}$ ) отделить элементы объекта от элементов окружающего фона и определить форму объекта путем отнесения отсчетов  $B_i > B_{id}$  к объекту, а  $B_i < B_{id}$  – к фону. Аналогично происходит дешифрирование объектов с малой интенсивностью (реки, озера, дороги, взлетные полосы и рулежные дорожки аэродромов, радиолокационные тени от объектов и т.д.).

Благодаря свойствам зрительного анализатора (ассоциативная обработка) обнаружение аномалии может происходить и иным образом. Оператор, рассматривая РЛИ с большого расстояния, мысленно выполняет межэлементное некогерентное накопление по площади участка «леса». Дисперсии законов распределения уменьшаются в  $N_s$  раз, как это показано на рис. 7.22, *б*. Соответственно меняется порог и вероятность обнаружения «леса» (она равна в этом случае также  $P_{obn.ob}=0,8$ ).

Рассмотренные выше соотношения справедливы не только для однородного «леса» с постоянной УЭПР, но и для объекта с неравномерным распределением ЭПР в отдельных элементах разрешения. При большом числе элементов разрешения, приходящихся на площадь объекта, суммарный процесс нормализуется (действует центральная предельная теорема) и вероятность обнаружения оказывается зависящей только от отношения суммарной ЭПР объекта к его площади, что аналогично случаю объекта, имеющего равномерное распределение УЭПР.

Ассоциативные возможности зрительного анализатора можно проиллюстрировать на примере «дешифрирования», приведенного на рис. 7.23 искусственного РЛИ, сформированного из шумового нормального процесса, два уровня с контрастом 3 дБ (имитации воды и суши). Для согласования отпечатков РЛИ с характеристиками анализатора они представлены в трех вариантах – амплитудного (выделение слабых контрастов) и двух энергетических – нормального (выделение ярких отметок) и с повышенной яркостью, но с ограниченными яркими отметками (промежуточный случай). На такой сцене можно выделить образования (аномалии), характерные для ярких точечных объектов (опоры электросетей темных протяженных объектов (объекты гидрографии, ВПП аэродромов, радиолокационные тени) и ярких групповых целей (здания, инженерные сооружения, группы деревьев).



**Рис. 7.23.** Иллюстрация ассоциативных возможностей зрительного анализатора:

*a* – искусственное из шумового процесса амплитудное РЛИ с разрешением 5 м, имитирующее участок суши и водную поверхность с контрастом 3 дБ, «береговая линия» – сектор окружности; *б, в* – энергетические РЛИ, нормальное (*б*) и с увеличенной яркостью (*в*); *г-е* – результаты «дешифрирования», интерпретация отметок (отмечены рамками или усилены яркостью): 1 – причал у берега, 2 – реки, каналы, дороги, 3 – мосты, 4 – загрязнения на водной поверхности, 5 – суда у причала, 6 – дамба, 7 – опоры электросетей и освещения, 8 – мелкие суда в акватории, 9 – инженерные сооружения, здания

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Данный пример может быть положен в основу количественной оценки достоверности РЛИ с присутствием артефактов, вызванных неоднозначностью сигналов по азимуту/дальности, нелинейностями в тракте РСА, некомпенсированными остатками от восстановления сигнала после сжатия и др. В качестве критерия достоверного РЛИ можно принять значение ЭПР группового объекта, для которого мала вероятность ложной тревоги формирования похожего на него образа на РЛИ, и ЭПР объекта превышает пороговый уровень

$$\sigma_A \geq \frac{\sigma_{\text{ne\_sum}}}{N} \ln(kN_{\text{frag}}), \quad (7.46)$$

где  $\sigma_{\text{ne\_sum}}$  – шумовой эквивалент суммарных помех на РЛИ;  $N$  – число элементов разрешения по площади группового объекта (примерно равно числу пикселей);  $N_{\text{frag}}$  – размер фрагмента наблюдения, в котором должно быть исключено формирование ложных образов;  $k \approx 5 \dots 10$  – коэффициент запаса.

Формула относится к ЭРЛИ с одним наблюдением. Некогерентное накопление может быть учтено изменением параметра  $N$ .

Данные, иллюстрирующие количественные характеристики процесса визуально-инструментального дешифрирования рассмотренной «шумовой» модели РЛИ, сведены в табл. 7.4 для примера РСА, значений порога обнаружения и характеристик наблюдаемой обстановки.

**Таблица 7.4. Параметры обнаружения элементов фона и целей при визуально-инструментальном дешифрировании РЛИ**

Параметр	Значение	Примечание
1	2	3
Пространственное разрешение РСА, м	5	
Площадь элемента разрешения, м <sup>2</sup>	25	
Чувствительность РСА $\sigma_{\text{не}}^0$ , дБ	-20	
Эквивалентная ЭПР элемента шума $\sigma_{\text{не}}$ , м <sup>2</sup>	0,25	
УЭПР фона (равнина) $\sigma^0$ , дБ	-20	
Суммарная ЭПР элемента шум+фон, м <sup>2</sup>	0,5	
Порог обнаружения, м <sup>2</sup>	0,35	Критерий идеального наблюдателя (шум/фон)
Вероятность: идентификации элемента шума ложной тревоги обнаружения элемента фона пропуска элемента фона обнаружения цели пропуска цели	0,75	Экспоненциальное распределение мощности шума, фона, целей
	0,25	
	0,50	
	0,50	
	0,97	ЭПР цели $\sigma=12$ м <sup>2</sup>
0,03		
Достоверность принятия правильного решения по идентификации: элемента шум/фон шум/цель	0,63	Априорная вероятность 0,5
	0,86	

### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Продолжение табл. 7.4

1	2	3
Порог обнаружения, м <sup>2</sup>	1,15	Критерий Неймана-Пирсона
Вероятность: идентификации элемента шума	0,99	
ложной тревоги	0,01	
обнаружения элемента фона	0,10	
пропуска элемента фона	0,90	
обнаружения цели	0,90	ЭПР цели $\sigma=12 \text{ м}^2$
пропуска цели	0,10	
Достоверность принятия правильного решения по идентификации: элемента шум/фон	0,55	Априорная вероятность 0,5
шум/цель	0,95	
Порог обнаружения, м <sup>2</sup>	1,75	Последовательный анализ
Вероятность: идентификации элемента шума	0,999	
ложной тревоги	0,001	
обнаружения цели	0,86	ЭПР цели $\sigma=12 \text{ м}^2$
пропуска цели	0,14	
Достоверность принятия правильного решения по идентификации шум/цель	0,94	
Порог обнаружения, м <sup>2</sup>	2,30	Последовательный анализ
Вероятность: идентификации элемента шума	0,9999	
ложной тревоги	0,0001	
обнаружения цели	0,82	ЭПР цели $\sigma=12 \text{ м}^2$
пропуска цели	0,18	
Достоверность принятия правильного решения по идентификации шум/цель	0,92	

Примем, что анализируется ЭРЛИ с одним наблюдением для модели диффузного отражения, характеризуемого экспоненциальным законом распределения мощности. Контраст суши относительно спокойной водной поверхности (озеро) составляет 3 дБ. Отметки на РЛИ, превышающие порог идеального наблюдателя, у береговой черты можно принять за изрезанность берега, но идентифицировать отметку, как причаленный катер, следует только при ее ЭПР не менее  $\sigma_A=12 \text{ м}^2$ , что соответствует вероятности ее обнаружения, равной 0,9 при вероятности ложной тревоги  $F=10^{-2}$ . Заметим, что при таком решении на каждый квадратный километр озера (~20×20 пикселей РЛИ) придется в среднем по четыре таких обнаруженных «катера», что может представлять интерес только для служб рыбнадзора.

Применив к полученной ситуации метод последовательного анализа Вальда [136] и подняв порог до уровня ложной тревоги  $F=10^{-4}$ , получим снижение вероятности обнаружения целей с  $\sigma_A=12 \text{ м}^2$  до 0,82 при одной ложной тревоге на 250 км<sup>2</sup>

поверхности озера. Достоверность правильной идентификации пикселей РЛИ (шум или катер) составит 0,918.

В результате приведенного рассмотрения можно сделать достаточно тривиальный вывод, что для достоверного обнаружения на РЛИ отметок, принадлежащих наблюдаемой обстановке, необходимо выбирать порог обнаружения не менее 1,75 по отношению к СКО суммарного процесса на локальных участках неотражающей поверхности (река, озеро, радиолокационные тени). На этих участках выходной сигнал определяется суммой мощностей шума, интегрального уровня боковых лепестков импульсного отклика РСА плюс мощность артефактов, вызванных неоднозначностью сигналов по дальности и азимуту, а также нелинейностями в сквозном тракте РСА. При таком выборе порога вероятность ложного принятия случайного выброса на РЛИ за объект наблюдения не превысит  $10^{-3}$ .

Для визуально-инструментального дешифрирования РЛИ используют специализированные пакеты обработки радиолокационной информации. Можно также применить программу Photoshop или типовые процедуры среды MATLAB.

Важный вопрос, связанный со зрительным восприятием изображений, касается числа градаций яркости, воспринимаемых оператором при наблюдении РЛИ. Оно во многом зависит от характеристик отображающей среды. Как это сделано на рис. 7.23,б и в, можно разделить РЛИ на интервалы яркостей для раздельного отображения яркостных «слоев».

Расширить динамический диапазон восприятия монохромных изображений (до трех раз) можно путем преобразования их в псевдоцветные. Эту процедуру легко реализовать при компьютерной обработке снимков с их распечаткой на цветных принтерах. Однако на псевдоцветном РЛИ теряется способность зрительного анализатора к сглаживанию откликов по площади однородных сегментов (отсутствует свойство определять «средний цвет»).

Вопросы, связанные с отображением радиолокационной информации, рассмотрены в следующем разделе.

### 7.4. Отображение радиолокационной информации

#### 7.4.1. Структурная схема модели преобразования информации при визуальном дешифрировании РЛИ

Рассмотрим особенности преобразования радиолокационной информации при отображении РЛИ на дисплее (проекторе) или получении твердой копии РЛИ на бумаге (фотобумаге) для зрительного восприятия РЛИ. Следует рассматривать две задачи отображения РЛИ: для презентаций и отчетов (включая материалы с результатами тематической обработки) и для дешифрирования РЛИ. В общем случае для первой задачи требуется отображение РЛИ на соответствующем носителе с наилучшими изобразительными свойствами. Для второй задачи требуется полнота представления информации для ее восприятия зрительным анализатором.

Обобщенная структурная схема преобразования и обработки радиолокационной информации представлена на рис. 7.24. Она включает в себя следующие функциональные узлы:



## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

пространственные линейные фильтры обработки фрагментов радиолограммы (парциальные апертуры или спектры), сформированной отраженными от наблюдаемой местности сигналами. Результаты фильтрации представлены в виде набора комплексных РЛИ для межэлементного накопления после сжатия радиолограммы по дальности и азимуту;

квадратичные детекторы парциальных апертур (спектров), на выходе которых формируются энергетические РЛИ (ЭРЛИ);

некогерентный накопитель, реализующий внутриэлементное и/или межэлементное накопление перед его регистрацией на устройстве отображения;

нелинейный преобразователь – устройство визуализации РЛИ (дисплей, печатающее устройство);

решающее устройство, представляющее собой зрительный анализатор. В него входят адаптивный межэлементный интегратор и пороговый обнаружитель. Некогерентное накопление в решающем устройстве интегрирует сигнал по полю объекта (обнаруженной аномалии). Результат обработки – идентифицированный объект наблюдения с оценкой его формы, яркостного распределения, статистик и классификацией типа объекта (в зависимости от детальности РЛИ и наличия априорной информации).

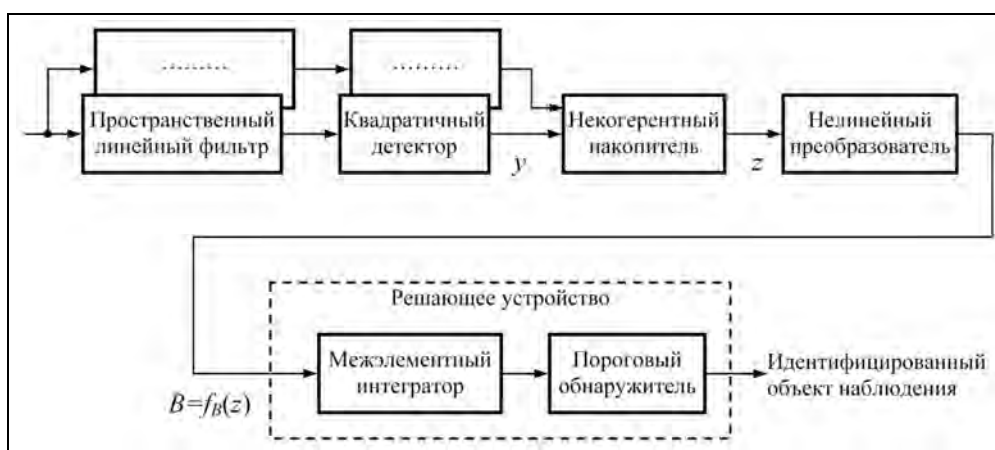


Рис. 7.24. Структурная схема преобразования и обработки радиолокационной информации при визуальном дешифрировании РЛИ

Следуя методике работы [151\*], оценим контрастную чувствительность и радиометрическое разрешение при визуальном дешифрировании РЛИ, а также число различимых градаций. В общем случае решающее устройство оценивает среднюю мощность принятого сигнала по совокупности независимых отсчетов  $N=N_e \times N_s$ , реализуемых аппаратным внутриэлементным накоплением  $N_e$  до нелинейного преобразования и межэлементным накоплением  $N_s$  по площади объекта в зрительном анализаторе после нелинейного звена.

Будем рассматривать процессы на входе некогерентного накопителя  $y$ , нелинейного преобразователя  $z$  и решающего устройства  $B=f_B(z)$ .

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Ограничимся случаем наблюдения протяженных объектов (фона местности), когда общее число независимых отсчетов по полю объекта (аномалии) велико. Тогда процесс на входе порогового обнаружителя нормализуется и для его описания достаточно знать среднее его значение и дисперсию (или СКО), которые вычисляются по первым двум моментам одномерного распределения входного процесса. На выходе квадратичного детектора имеем случайный процесс сигнал+шум, функция распределения которого подчиняется экспоненциальному закону

$$p_y(y) = \frac{1}{M_y} e^{-\frac{y}{M_y}}, \quad (7.47)$$

где  $M_y$  – средняя мощность суммарного процесса на входе детектора.

Для простоты примем, что коэффициент передачи по мощности для сквозного тракта РСА, включая выход некогерентного накопителя, равен единице и выразим процесс на входе нелинейного звена в терминах удельной ЭПР — сигнала (фона местности) и шумов приемника. Для краткости суммарный входной процесс, являющийся суммой УЭПР сигнала, отраженного от фона местности  $\sigma_s^0$ , и УЭПР шумового эквивалента  $\sigma_{ne}^0$  обозначен как  $\sigma_{sne}^0$

$$M_y = \sigma_s^0 + \sigma_{ne}^0 = \sigma_{sne}^0. \quad (7.48)$$

В некогерентном накопителе (реализованным как внутриэлементный или межэлементный накопитель или обоих типов) происходит усреднение сигналов

$z = \frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} y_i$ , которое характеризуется  $\chi_{2N_e}^2$ -распределением с  $2N_e$  степенями свободы (см. (3.53)–(3.55) раздела 3.5):

$$p_z(z) = \frac{N_e^{N_e}}{M_z (N_e - 1)!} e^{-\frac{N_e z}{M_z}} \left( \frac{z}{M_z} \right)^{N_e - 1}. \quad (7.49)$$

Заметим, что среднее значение процесса не меняется  $M_z = M_y = \sigma_{sne}^0$ , а дисперсия и СКО уменьшаются соответственно в  $N_e$  и квадратный корень из  $N_e$  раз

$$M_z = \sigma_{sne}^0; \quad D_z = \left( \sigma_{sne}^0 \right)^2 / N_e; \quad \sigma_z = \sigma_{sne}^0 / \sqrt{N_e}. \quad (7.50)$$

Следующее звено – нелинейный преобразователь, который характеризуется зависимостью яркости  $B$  от мощности входного процесса:

$$f_B(z) = B(z). \quad (7.51)$$

Представим функцию  $f_B(z)$  в виде степенного ряда и ограничимся членами нулевого и первого порядков, определяющими постоянный уровень выходного сигнала и СКО флуктуаций, которое будет зависеть от средней крутизны характеристической кривой регистратора в диапазоне яркостей, отображающих данную аномалию с суммарной УЭПР  $\sigma_{sne}^0$

$$f_B(z) = B(z) \approx f_0 + g_B z, \quad (7.52)$$

где

$$g_B = \text{mean} \left\{ \frac{df_B}{dz} \right\}. \quad (7.53)$$

Возможность такого допущения обусловлена тем, что при наблюдении протяженных объектов произвольной конфигурации, но связной формы, зрительный анализатор работает как близкий к оптимальному усредняющему фильтру, процесс на выходе которого (выходе решающего устройства) нормализуется и для его описания достаточно вычислить его среднее значение и дисперсию (или СКО).

Параметры процесса на выходе нелинейного преобразователя вычисляют через функцию распределения входного процесса:

$$M_B = \text{mean} \{B\} = \int_0^{\infty} f_B(z) p_z(z) dz, \quad (7.54)$$

$$\sigma_B^2 = D_B = \text{mean} \{B^2\} - M_B^2 = \int_0^{\infty} f_B^2(z) p_z(z) dz - M_B^2, \quad (7.55)$$

$$g_B = \left| \frac{df_B(z)}{dM_z} \right| M_z = \left| \int_0^{\infty} \frac{d}{dM_z} \{f_B(z)\} p_z(z) dz \right| = \left| \int_0^{\infty} f_B(z) \frac{dp_z(z)}{dM_z} dz \right|, \quad (7.56)$$

где модуль учитывает возможность появления падающего участка характеристической кривой регистратора РЛИ, меняющего знак, но не величину флуктуаций выходного процесса. Для функции распределения вида (7.49) значение производной

$$\frac{dp_z(z)}{dM_z} = \frac{N_e}{M_z} \left( \frac{z}{M_z} - 1 \right) p_z(z), \quad (7.57)$$

откуда

$$g_B = \left| N_e \int_0^{\infty} f_B(z) \left( \frac{z}{M_B} - 1 \right) p_z(z) dz \right|. \quad (7.58)$$

Последнее преобразование – усреднение по площади аномалии путем межэлементного накопления, реализуемого зрительным анализатором:

$$Z \approx \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} B_i. \quad (7.59)$$

На выходе межэлементного накопителя параметры процесса

$$M_Z = M_B; \quad \sigma_Z = \frac{\sigma_B}{\sqrt{N_s}}; \quad g_Z = g_B. \quad (7.60)$$

Приведенные выше соотношения позволяют оценить контрастную чувствительность и радиометрическое разрешение РСА. Процесс на выходе нелинейного

звена соответствует изменению яркости изображения на дисплее или другом отображающем РЛИ носителе. Соотношения (7.50), (7.60) устанавливают функциональную зависимость между УЭПР наблюдаемой местности и средним уровнем сигнала, а также флуктуациями при его отображении. Предположим, что на входе имеем контраст двух участков  $\Delta\sigma^0$ . Относительный контраст суммарных процессов сигнал+шум и контраст УЭПР двух участков определяются соотношениями

$$\delta K = \frac{\Delta\sigma^0}{\sigma_{\text{сн}}^0} = \frac{\Delta\sigma^0}{\sigma_s^0 + \sigma_{\text{не}}^0}, \quad (7.61)$$

$$\delta K_s = \frac{\Delta\sigma^0}{\sigma_s^0} = \delta K \left( 1 + \frac{\sigma_{\text{не}}^0}{\sigma_s^0} \right).$$

По формулам (7.52)–(7.61) можно установить связь между входными и выходными параметрами РЛИ, после чего, сопоставив эти параметры с моделью зрительного анализатора, найти контрастную чувствительность и радиометрическое разрешения РСА при визуальном дешифрировании РЛИ в зависимости от характеристик отображающего устройства.

#### 7.4.2. Линейный регистратор с ограничением

**Контрастная чувствительность РСА.** Анализ характеристик регистрирующих сред (фотопленка, печатающие устройства, дисплеи) позволяет выделить общие свойства устройств отображения РЛИ: наличие начальной засветки  $f_0$ , ограничение максимального уровня  $f_{\text{max}}$ , изменение крутизны по характеристической кривой (для случая коэффициента контрастности  $\gamma \neq 1$ ). Следует также отметить возможность изменения коэффициента контрастности или формирования характеристической кривой любой формы путем цифрового преобразования РЛИ на входе устройства отображения. Таким способом могут быть реализованы пороговая обработка, разные виды гамма-коррекции, преобразование из энергетического РЛИ в амплитудное и др.

Рассмотрим сначала простейший случай идеализированного линейного регистратора с ограничением

$$f_B(z) = \begin{cases} 0 & z \leq 0 \\ z & 0 < z < 1 \\ 1 & z > 1 \end{cases}. \quad (7.62)$$

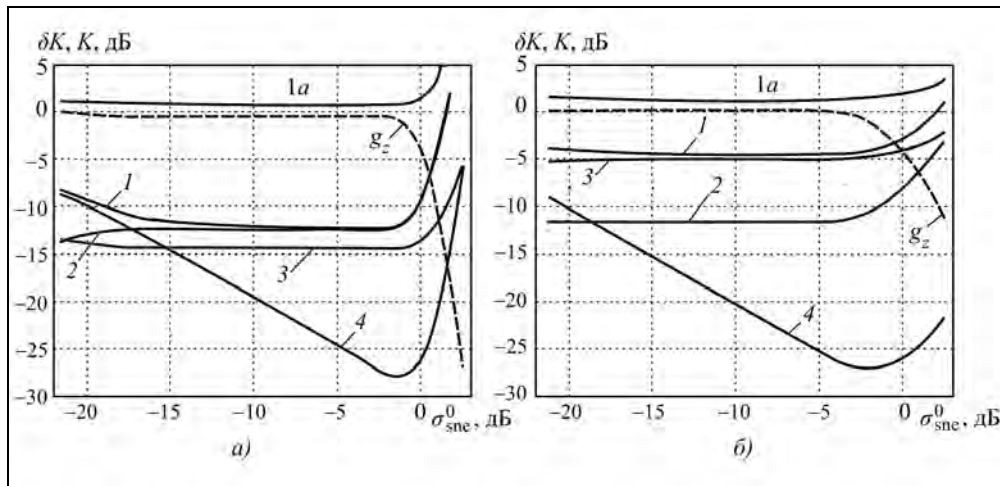
Параметры выходного процесса рассчитываем по формулам (7.52), (7.53), (7.56). На линейном участке амплитудной характеристики  $M_B = M_z$ ,  $\sigma_z = 1/\sqrt{N}$ ,  $g_z = 1$ . Учтя нелинейность, рассчитываем входящие в формулу (7.44) составляющие дифференциальной контрастной чувствительности при визуальном дешифрировании

$$\delta K_N = \frac{a_{za}}{g_z \sqrt{N_e N_s}}; \quad \delta K_B = \frac{a_{za} \sigma_B}{g_z}; \quad \delta K_0 = \frac{a_{za} \sigma_0}{g_z M_B}. \quad (7.63)$$

На практике для интегральной оценки влияния суммы составляющих удобнее пользоваться не дифференциальным контрастом (по приращению), а абсолютным контрастом – отношением УЭПР в децибелах. Формула перехода от дифференциального к абсолютному контрасту имеет вид

$$K_{dB} = 10 \lg(\delta K + 1). \quad (7.64)$$

На рис. 7.25 показаны зависимости составляющих контрастной чувствительности РСА при визуальном дешифрировании РЛИ, записанного с помощью регистратора, имеющего линейную с ограничением характеристику. По оси абсцисс отложены значения УЭПР суммарного процесса фон+шум в децибелах. Путем изменения коэффициента передачи тракта РСА они могут быть смещены так, чтобы левая граница соответствовала фактической чувствительности РСА  $\sigma_{nc}^0$  или требуемому начальному уровню. По оси ординат кроме значения дифференциального контраста  $\delta K_{dB} = 10 \lg(\delta K)$  для суммарного процесса отложены также значения абсолютного контраста в децибелах. В качестве исходных данных взяты следующие параметры: потери зрительного анализатора  $a_{za}=3,15$  (5 дБ), контрастная чувствительность глаза для гладкого изображения  $\delta K_B=0,08$  (-11 дБ), составляющая рассеянного света  $\delta K_0=0,001$  (-30 дБ). Для рис. 7.25,а полное число наблюдений составляет  $N=10^4$ , при числе наблюдений до нелинейности  $N_e=25$  и числе усредняемых зрительным анализатором наблюдений  $N_s=400$ . Это соответствует площади протяженного объекта (аномалии), равной 400 элементам разрешения РСА и суммарному числу наблюдений по площади объекта  $N=N_e \times N_s=10^4$ .



**Рис. 7.25.** Составляющие контрастной чувствительности РСА при визуальном дешифрировании РЛИ для линейного с ограничением регистратора при числе наблюдений в РЛИ  $N_e=25$  и полном числе  $N=N_e \times N_s=10^4$  (а), а также при  $N_e=4$  и  $N=10^2$  (б) в зависимости от УЭПР суммарного процесса сигнал+шум: 1, 1а – суммарные кривые дифференциальной (1) и абсолютной (1а) контрастной чувствительности РСА; 2 – составляющая контрастной чувствительности глаза; 3 – флуктуационная составляющая; 4 – составляющая рассеянного света;  $g_z$  – средняя крутизна характеристики регистратора (пунктир)

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

На рис. 7.25,б показана более типичная ситуация  $N_e=4$  и  $N=10^2$  – наблюдение протяженных объектов с усреднением  $10 \times 10$  элементов разрешения ( $N_e=4$  – до регистрации и  $N_s=25$  – зрительным анализатором). Это соответствует участку на земной поверхности площадью 1 га для РСА с пространственным разрешением 10 м.

Как следует из рис. 7.25, а, для «гладкого» РЛИ сквозные характеристики (кривые 1 и 1а, а также график средней крутизны  $g_z$ ) имеют горизонтальные участки с постоянным значением. Основной вклад в контрастную чувствительность создает контрастная чувствительность глаза (кривая 2). Составляющая рассеянного света приводит к потерям до 4 дБ при малых уровнях входных сигналов. Разрешаемый контраст составляет: дифференциальный минус 8 дБ, абсолютный – примерно 1 дБ.

Для изображенного на рис. 7.25, б варианта с накоплением перед регистрацией РЛИ  $N_e=4$  и суммарном числе наблюдений по площади объекта  $N=100$  контрастная чувствительность (минус 9 дБ) ограничена флуктуационной составляющей (кривая 3), динамический диапазон по уровню контрастной чувствительности минус 8 дБ составляет около 23 дБ (левая часть графика, в которой начинается резкое ухудшение контрастной чувствительности на графике не показана). Разрешаемый контраст составляет: дифференциальный минус 5 дБ, абсолютный – примерно 1,2 дБ.

При дальнейшем анализе практических устройств отображения будем предполагать, что перед отображением информации для визуального дешифрирования реализуется некогерентное накопление с  $N_e \geq 4$  путем его сглаживания или путем применения рассмотренных в разделе 7.1 адаптивных алгоритмов фильтрации РЛИ, сохраняющих высокий контраст малоразмерных точечных или групповых целей.

**Число разрешаемых градаций на РЛИ.** Как известно, число градаций, разрешаемых на изображении, выражается через контрастное разрешение (которое в случае РЛИ совпадает с контрастной чувствительностью) с помощью интегрально-преобразования

$$n = \int_{\sigma_{\min}^0}^{\sigma_{\max}^0} \frac{d\sigma^0}{\delta K \sigma^0}, \quad (7.65)$$

где  $\delta K$  – контрастное разрешение РСА;  $\sigma^0$  – средняя УЭПР наблюдаемого участка местности;  $\sigma_{\min}^0$  и  $\sigma_{\max}^0$  – минимальное и максимальное значения УЭПР суммарного процесса сигнал+шум.

Наибольшее число градаций будет на «гладком» изображении при отсутствии флуктуаций, вызванных спекл-шумом. Число градаций будет зависеть от характеристической кривой регистратора РЛИ и параметров модели зрительного анализатора. В общем случае число градаций для линейного с ограничением регистратора РЛИ составит

$$n = \int_{\sigma_{\min}^0}^{\sigma_{\max}^0} \frac{d\sigma^0}{\sigma^0 \sqrt{\delta K_N^2 + (\delta K_B + \delta K_0)^2}}. \quad (7.66)$$

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

В табл. 7.5 приведены значения числа различных градаций для разных сочетаний параметров отображения линейного с ограничением регистратора РЛИ. Они показывают, что на число градаций в первую очередь влияет суммарное число наблюдений по площади объекта и меньше – распределение числа накоплений между аппаратно программными средствами и ассоциативными возможностями зрительного анализатора. Однако при больших размерах поля усреднения рассмотренная упрощенная модель зрительного анализатора может оказаться некорректной. Поэтому задача использования адаптивных методов фильтрации спекл-шума на РЛИ остается актуальной, в том числе их внедрение в рабочие места операторов-дешифровщиков и применение автоматизированных методов сегментации РЛИ на фрагменты с однородной статистикой.

**Таблица 7.5. Число различных градаций при визуальном дешифрировании РЛИ**

Параметры РЛИ и объекта			Число различных градаций на РЛИ	Примечание
число наблюдений в элементе разрешения	число элементов по площади объекта	полное число наблюдений		
Линейный с ограничением регистратор ЭРЛИ				
100	1000	$10^5$	27,7	«Гладкое» РЛИ
25	400	10000	26,8	
4	2500	10000	26,4	
1	10000	10000	26,2	
1	100	100	13,6	
4	25	100	13,7	Типичный режим наблюдения протяженных объектов
1	40	40	9,4	
4	10	40	9,5	
Дисплей с регистрацией ЭРЛИ				
4	2500	10000	18	
4	25	100	7,3	Типичный режим наблюдения протяженных объектов
4	10	40	5,1	
Дисплей с регистрацией АРЛИ				
4	25	100	7,2	Типичный режим наблюдения протяженных объектов
4	250	1000	8,5	

### **7.4.3. Отображение РЛИ на дисплее**

Оптимизация параметров отображения РЛИ для согласования с характеристиками зрительного восприятия играет важную роль при проектировании рабочих мест операторов-дешифровщиков РЛИ, а также при оформлении отчетных документов и донесений по результатам тематической обработки информации. Первая задача,

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

касающаяся отображения РЛИ на экране дисплея, решается путем использования стандартных (Photoshop, Microsoft Office Picture Manager, Paint и др.) или специализированных программных средств (ENVI, ERDAS, SARscape, PHOTOMODE-RADAR [191, 541, 542, 549]), с помощью которых оператор настраивает параметры отображения РЛИ в соответствии со своими индивидуальными свойствами зрительного восприятия. Для второй задачи – отображения РЛИ на бумажном носителе должны учитываться усредненные характеристики зрительного анализатора, а также параметры конкретных регистрирующих устройств – принтеров и типа используемой бумаги.

В данном и следующем подразделах рассмотрен общий методологический подход к инструментальной оценке параметров отображения РЛИ для его визуального восприятия. Этот подход основан на проведенных применительно к оптическому синтезу РЛИ тщательных исследованиях путей оптимизации характеристик записи радиоголограммы на фотопленке, а также регистрации РЛИ на негативной фотопленке и их отпечатках на фотобумаге [145, 149\*, 156\*, 198].

**Измерение характеристической кривой изображения на дисплее или бумажном носителе.** Структурная схема измерения характеристик устройств отображения РЛИ приведена на рис. 7.26. В ее состав входят компьютер, используемый для формирования файла с градиационным клином, а также обработки результатов измерений, дисплей отображения клина на экране, печатающий принтер, отпечаток РЛИ, фотометр и цифровой фотоаппарат. В качестве программного обеспечения можно использовать пакет MATLAB для формирования клина и программу Photoshop для измерения характеристик РЛИ. Роль фотометра может выполнять бытовой экспоиметр, проградуированный в, так называемых, «действующих числах», соответствующих изменению яркости в два раза (логарифмическая шкала). Особо высокой точности измерений не требуется (важны относительные данные) из-за разброса характеристик принтера и бумаги, условий наблюдения (освещенности), а также индивидуальных свойств зрительного восприятия.

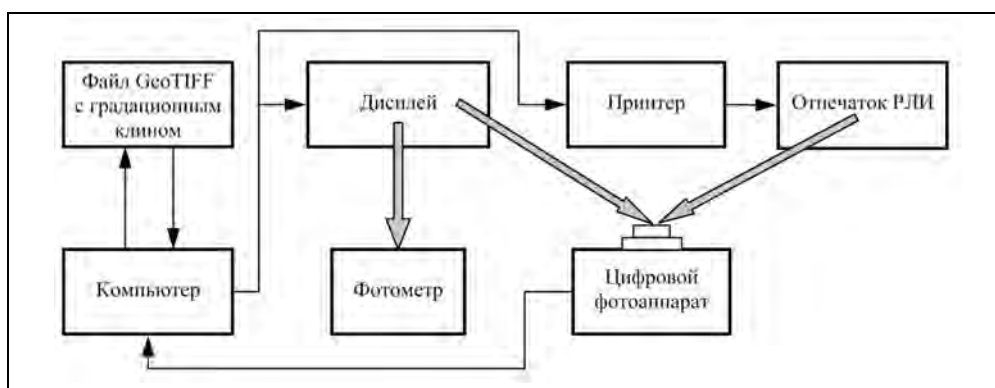


Рис. 7.26. Структурная схема измерения характеристик отображения РЛИ

Измерения проводятся в следующей последовательности. С помощью программы `imwrite(Test, 'Test_name.tif', 'tif')` среды MATLAB (или иной) формируют



файл с градационным клином, аналогичным клину, прилагаемому к РЛИ, которые помещены в разделе 7.1, но с числом пикселей по вертикали 400...500. Диапазон уровней клина 0...1 ед., шаг декремента входных значений равен 0,707 от максимального значения, что соответствует шагу 3 дБ при отображении АРЛИ или шагу 1,5 дБ при отображении ЭРЛИ. Такой шаг совпадает со стандартным фотометрическим клином, используемым для испытаний фотоматериалов [145].

Файл с клином отображают на экране дисплея. Устанавливают режим работы дисплея – яркость 100 %, контрастность – 100 %. С помощью фотометра измеряют яркость его полей. Строят характеристическую кривую дисплея (в относительных единицах). Далее калибруют цифровой фотоаппарат. Для этого фотографируют экран дисплея (предварительно можно установить чувствительность фотоаппарата 400 или 800 ISO). Полученный цифровой снимок просматривают программой Photoshop, тип изображения – *серое* (Mode – Grayscale) и с помощью опции *Гистограмма* (Histogram) измеряют уровни полей клина (от 0 до 255), после чего сопоставляют их с показаниями фотометра.

После проведенной калибровки фотоаппарат пригоден для снятия характеристических кривых других дисплеев или данного дисплея в пониженных режимах яркости и контрастности изображения. С помощью откалиброванного цифрового фотоаппарата измеряют также характеристики отражения от полей клина, отпечатанного на бумажном носителе. Детально требования к печати РЛИ рассмотрены в подразделе 7.4.4.

**Характеристики РЛИ на дисплее.** Радиолокационное изображение на дисплее характеризуется следующими параметрами:

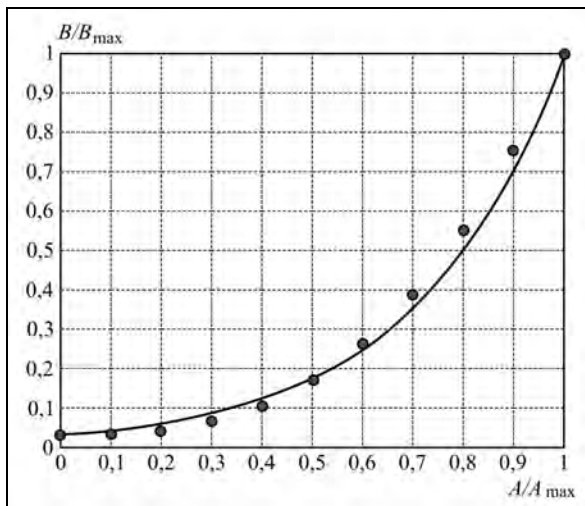


Рис. 7.27. Зависимость яркости дисплея от амплитуды входного сигнала

- 1) максимальной  $B_{\max}$  и минимальной  $B_{\min}$  яркостями;
- 2) характеристической кривой ( $\gamma$ -характеристикой), определяющей зависимость яркости от амплитуды входного сигнала;
- 3) масштабом изображения – размером пикселя на экране.

На рис. 7.27 приведена типичная характеристическая кривая ЖК-дисплея при начальных настройках: яркость 100 %, контрастность 100 %.

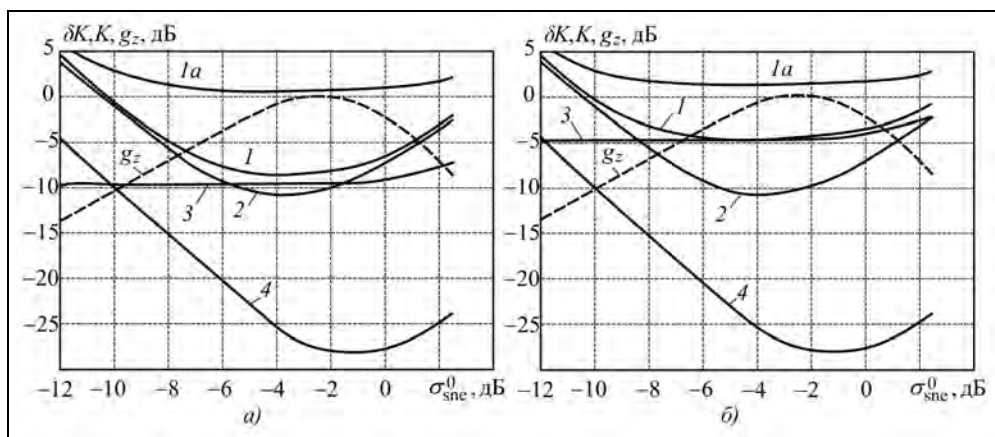
Аппроксимирующая зависимость яркости дисплея от амплитуды входного сигнала (отмечена на графике кружками) характеризуется формулой

$$B_I(A) \approx (B_{\max} - B_{\min}) \left( \frac{A}{A_{\max}} \right)^\gamma + B_{\min}, \quad (7.67)$$

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

где  $\gamma$  – коэффициент контрастности;  $B_{\max}$  и  $B_{\min}$  – максимальная и минимальная яркости в настроенном рабочем режиме дисплея. В частности, для испытанного типа дисплея FLATRON LCD 575LE фирмы LG  $\gamma=2,7$ ,  $B_{\max}=1$  и  $B_{\min}=0,042$  (в относительных единицах), динамический диапазон изображения (отношение максимальной яркости к минимальной) составляет  $D=B_{\max}/B_{\min}=23,8$ .

Для рассматриваемого случая большого некогерентного накопления  $N=N_e \times N_s$  размах ( $\pm 3$ -СКО) флуктуаций яркости на экране значительно меньше общего перепада яркостей на носителе. Поэтому, оценка параметров выходного процесса по локальному значению средней крутизны характеристической кривой дисплея допустима. Кривые для составляющих контрастной чувствительности РСА при визуальном дешифрировании ЭРЛИ на дисплее в зависимости от нормированного уровня мощности на входе и от УЭПР суммарного процесса сигнал+шум приведены на рис. 7.28. Числа различаемых градаций на дисплее приведены в табл. 7.5.



**Рис. 7.28.** Составляющие контрастной чувствительности РСА при визуальном дешифрировании ЭРЛИ на дисплее при числе наблюдений в РЛИ  $N_e=4$  и полном числе  $N=N_e \times N_s=10^4$  (а), а также при  $N_e=4$  и  $N=10^2$  (б) в зависимости от УЭПР суммарного процесса сигнал+шум:

1, 1а – суммарные кривые дифференциальной (1) и абсолютной (1а) контрастной чувствительности РСА; 2 – составляющая контрастной чувствительности глаза; 3 – флуктуационная составляющая; 4 – составляющая рассеянного света;  $g_z$  – средняя крутизна характеристики регистратора (пунктир)

В отличие от линейного регистратора характеристическая кривая дисплея имеет коэффициент контрастности  $\gamma=2,7$  (вместо единицы). Сравнение графиков контрастной чувствительности (разрешаемого контраста по суммарному процессу фон+шум) для дисплея с линейным регистратором показывает увеличение значений разрешаемого контраста в области слабых сигналов (до 5 дБ, вместо 1,5 дБ, кривые 1а). Это вызвано значительно большим уровнем начальной яркости ( $B_{\min} = 0,042$  вместо  $\delta K_0=0,001$ ). Число разрешаемых градаций на дисплее на 20 % меньше, чем для линейного регистратора (см. табл. 7.5). Резко сокращен динамический диапазон входных сигналов до 14 дБ вместо 23 дБ. Это вызвано возрастанием уровня минимальной яркости и большой величиной коэффициента контрастности.

В целом, рассмотренный вариант отображения РЛИ на дисплее не согласован с характеристиками зрительного анализатора.

**Согласование характеристик дисплея с характеристиками зрительного восприятия РЛИ.** Возможным вариантом согласования характеристик дисплея и зрительного анализатора состоит в том, что на вход дисплея подают не ЭРЛИ после некогерентного накопления, а АРЛИ, полученное путем извлечения квадратного корня из ЭРЛИ. Графики контрастной чувствительности для этого варианта согласования приведены на рис. 7.29. Динамический диапазон воспринимаемого РЛИ значительно расширен до 30...40 дБ в зависимости от требуемой контрастной чувствительности. Расширение динамического диапазона достигается при практически неизменном числе различаемых градаций на экране (уменьшается на 15 %, табл. 7.5), но при этом ухудшается дифференциальная контрастная чувствительность пропорционально расширению динамического диапазона.

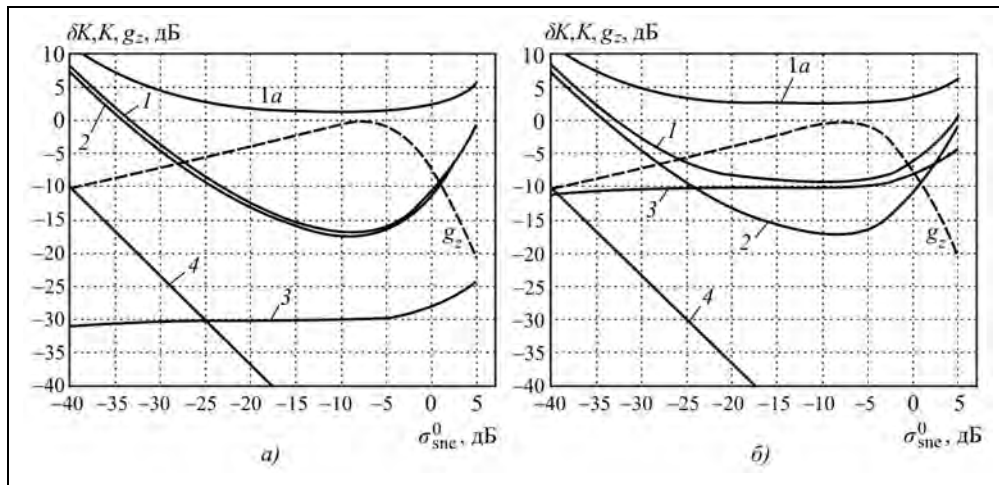


Рис. 7.29. Составляющие контрастной чувствительности РСА

при визуальном дешифрировании РЛИ на дисплее с регистрацией амплитудного РЛИ от УЭПР суммарного процесса сигнал+шум:

1, 1a – суммарные кривые дифференциальной (1) и абсолютной (1a) контрастной чувствительности РСА; 2 – составляющая контрастной чувствительности глаза; 3 – флуктуационная составляющая; 4 – составляющая рассеянного света;  $g_z$  – средняя крутизна характеристики регистратора (пунктир) (число наблюдений в РЛИ  $N_c=4$ , полное число наблюдений по площади объекта  $N=10000$  (a) и  $N=100$  (б))

При практическом дешифрировании РЛИ на дисплее имеется возможность смещать интервал отображаемых УЭПР на экране в сторону уменьшения с ограничением ярких целей или в сторону уменьшения с наблюдением только ярких целей. Дополнительно можно задать корректирующий коэффициент контрастности для установления оптимального режима восприятия конкретного фрагмента РЛИ.

**Выбор масштаба отображения на дисплее.** Разрешающая способность человеческого глаза с расстояния наилучшего видения составляет 0,1...0,2 мм. Наилучшее контрастное разрешение достигается при диаметре отметки на экране более 1 мм (см. рис. 7.19). Диаметр пикселя на экране дисплеев среднего качества

(1024×768 точек на экран) составляет 0,3...0,4 мм, но зернистой структуры изображения на экране не заметно. При отображении РЛИ, предназначенного для презентаций (требуются наилучшие изобразительные свойства), масштаб вывода на экран должен быть равен 1, при котором размер пикселя РЛИ равен размеру пикселя на экране.

При выводе РЛИ на экран для целей дешифрирования размер пикселя РЛИ (точечная цель) должен быть увеличен до масштаба до М4:1. При работе с РЛИ без некогерентного накопления (одно наблюдение) или с РЛИ, которые после некогерентного накопления подвергались прореживанию (децимации), необходима интерполяция РЛИ (методом раздвижки спектра или иными, например, бикубической интерполяцией с применением программы Photoshop), чтобы восстановить непрерывность исходной информации, которая теряется при дискретизации сигнала частотой квантования и частотой повторения, несмотря на соблюдение условия Котельникова-Шеннона. Увеличение масштаба более М4:1 не приводит к улучшению дешифрируемости РЛИ, поскольку границы между соседними пикселями РЛИ при увеличении становятся размытыми, а это вызывает возрастание различимого контраста на РЛИ.

Примеры РЛИ, иллюстрирующие рекомендации по отображению информации приведены в следующем подразделе настоящей главы, посвященном получению твердой копии РЛИ на бумажном носителе.

### 7.4.4. Получение твердой копии РЛИ на бумажном носителе

**Градационные характеристики изображений на бумажном носителе.** Качество изображения на бумажном носителе определяется типом бумаги (*простая, специальная или фотобумага*), а также типом и характеристиками печатающего устройства – принтера. Кроме того, следует учитывать свойства программы, с помощью которой выполняется печать изображения (Word, Photoshop, PDF, Powerpoint). В принтерах обычно предусматривается широкий набор режимов работы с разными скоростью печати, расходом красителя и разным качеством печати с учетом применяемой бумаги. Не рассматривая режимы черновой и экономной печати, остановимся на режимах, обеспечивающих качество печати, пригодное для дешифрирования РЛИ.

Для этой цели возможно применение универсальной офисной простой бумаги плотностью 80 г/м<sup>2</sup>, предназначенной для струйных и лазерных принтеров. Ее некоторым недостатком является впитывание чернил при печати на струйных принтерах и невозможность добиться глубокого почернения. Более качественные отпечатки получают на плотной специальной бумаге, а также на фотобумаге. Соответствующие режимы предусмотрены в настройке принтера. Как показывает опыт, при печати на простой бумаге лучшее качество отпечатков РЛИ получается не в режиме «высокое», а в режиме «фото» с коэффициентом контрастности – гамма печати 1,8.

В соответствии с методикой инструментальной оценки устройств отображения, приведенной в подразделе 7.4.3, и с учетом сформулированных рекомендаций по печати были получены характеристические кривые печати на принтере в зависимости от амплитуды входного сигнала. Они показаны на рис. 7.30 в относительной шкале 0...255 ед. и в нормализованном виде, приведенные к единице. Использовался струйный фотопринтер Epson-900. Кривые 1 соответствуют отпечатку на простой бумаге, кривые 2 – отпечатку на фотобумаге (L'PRO Fotojet Instant Dry

Gloss). Кривые для специальной бумаги проходят между ними. Для сравнения пунктиром показана характеристическая кривая линейного регистратора, рассмотренного в подразделе 7.4.2.

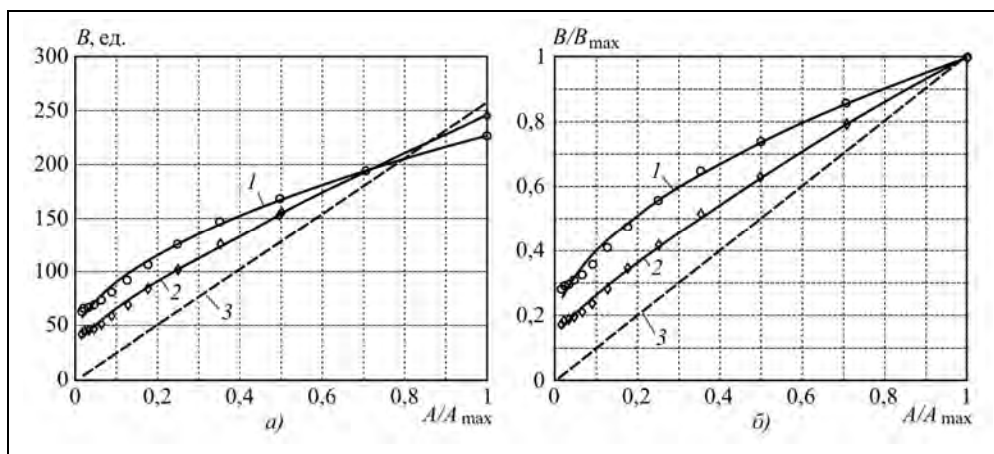


Рис. 7.30. Характеристические кривые зависимости яркости (отражающей способности) отпечатков РЛИ на бумажном носителе, в относительных единицах 0...255 (а) и нормированные к единице (б): 1 – простая бумага; 2 – фотобумага; 3 – линейный регистратор (пунктир) (метками показаны измеренные данные)

Таблица 7.6. Параметры изображений при отображении РЛИ на бумажном носителе для полного числа наблюдений  $N=100$  по площади объекта

Параметр	Тип бумаги		Примечание
	Простая	Фотобумага	
Минимальная яркость, ед.	36,1	29,4	Относительные единицы
Максимальная яркость, ед.	226	245	
Коэффициент контрастности	0,55	0,8	
Динамический диапазон регистрации	6,25	8,33	Отношение $B_{max}/B_{min}$
Число градаций ЭРЛИ	7,43	8,6	
Контрастная чувствительность ЭРЛИ, дБ	2,1	1,8	
Динамический диапазон входного сигнала, дБ	17	18,5	По контрастной чувствительности 3 дБ
Число градаций АРЛИ	5,2	7,1	
Контрастная чувствительность АРЛИ, дБ	6	4,75	
Динамический диапазон входного сигнала, дБ	27	34,0	По контрастной чувствительности 6 дБ
Отображение РЛИ на дисплее			
Число градаций ЭРЛИ	7,3		
Контрастная чувствительность ЭРЛИ, дБ	2,1		
Динамический диапазон входного сигнала, дБ	12		По контрастной чувствительности 3 дБ
Число градаций АРЛИ	10,7		
Контрастная чувствительность АРЛИ, дБ	6		
Динамический диапазон входного сигнала, дБ	38		По контрастной чувствительности 6 дБ

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Сплошными линиями показаны аппроксимирующие кривые, которые хорошо согласуются с измеренными данными, кроме начальных участков большой плотности. Аппроксимированные кривые в относительной шкале 0...255 ед. соответствуют формуле

$$B = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} \left( \frac{A}{A_{\max}} \right)^{\gamma} + B_{\min}, \quad (7.68)$$

где  $A$  – амплитуда на входе принтера;  $A_{\max}=255$  ед. – максимальный уровень входного сигнала;  $\gamma$  – коэффициент контрастности;  $B_{\min}$  и  $B_{\max}$  – минимальный и максимальный уровни яркости изображения.

Нормализованные характеристические кривые вычисляют по формуле

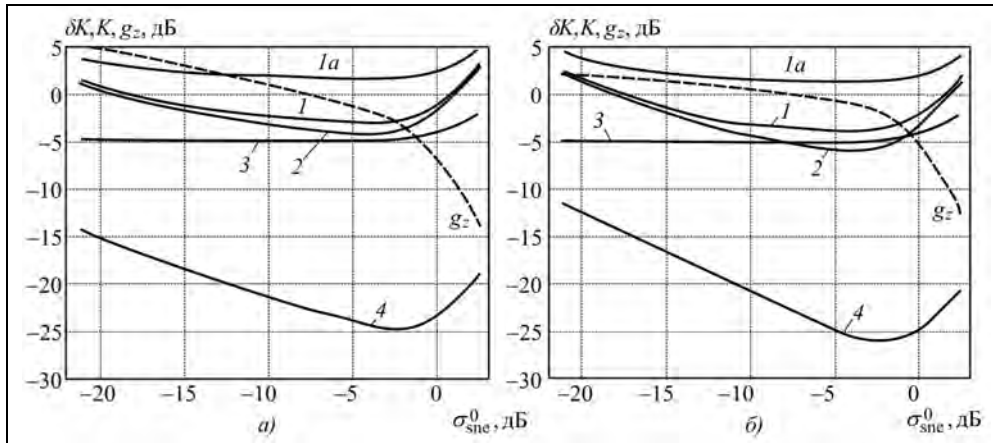
$$B = \frac{B}{B_{\max}} = \left( 1 - \frac{B_{\min}}{B_{\max}} \right) \left( \frac{A}{A_{\max}} \right)^{\gamma} + \frac{B_{\min}}{B_{\max}}. \quad (7.69)$$

Сводные данные по параметрам изображения на бумажном носителе и их сравнение с отображением на дисплее приведены в табл. 7.6.

Анализ приведенных графиков и их сравнение с характеристическими кривыми для дисплея показывают, что контрастность и динамический диапазон изображения на бумажном носителе значительно меньше, чем для дисплея. Максимальная яркость изображения на простой бумаге на 10 % ниже, чем на фотобумаге, а минимальная яркость – на 22 % выше, что приводит к падению контрастности изображения почти в 1,5 раза. В связи с этим для выпуска ответственных документов следует при печати РЛИ использовать *специальную* бумагу, которая по своим характеристикам приближается к фотобумаге.

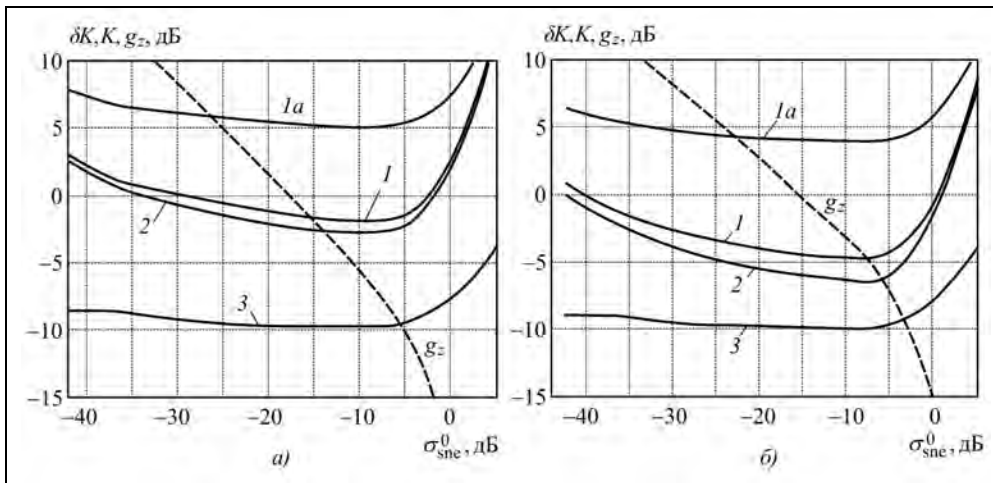
На рис. 7.31, 7.32 приведены кривые составляющих контрастной чувствительности для визуального восприятия РЛИ на бумажном носителе в случаях регистрации энергетических и амплитудных РЛИ для типичного случая четырех наблюдений в элементе разрешения РЛИ и полного числа наблюдений по площади объекта  $N=N_c \times N_s = 100$ . Зависимости аналогичны для отображения РЛИ на дисплее, но значения контрастной чувствительности выше, число различимых градаций меньше. Динамический диапазон входных сигналов печати на бумаге больше, чем у дисплея, что обусловлено меньшей контрастностью характеристических кривых. При печати ЭРЛИ разрешаемый контраст составляет 1,5...2 дБ, а при печати АРЛИ — возрастает до 4...5 дБ. Это необходимо учитывать при выборе режима печати в зависимости от сюжета обстановки на РЛИ.

Для типичных сюжетов предпочтителен вывод на принтер АРЛИ. Значения яркости печати РЛИ на бумаге выбирают таким образом, чтобы протяженные объекты с умеренным отражением (голая почва, трава) имели плотность на отпечатке 0,25...0,35 от максимального уровня белого (64...90 ед.). Это соответствует полям 4–5 (отсчет справа) градационного клина, который сопровождает приведенные в книге РЛИ. При таком выборе обеспечивается оптимальная контрастная чувствительность для наблюдения на отпечатках РЛИ положительных (леса, застроенная территория, яркие цели) и отрицательных контрастов (вода, радиолокационные тени от возвышенных объектов).



**Рис. 7.31.** Составляющие контрастной чувствительности РСА при визуальном дешифрировании ЭРЛИ на простой бумаге (а) и на фотобумаге (б) в зависимости от УЭПР суммарного процесса сигнал+шум:

*I, Ia* – суммарные кривые дифференциальной (*I*) и абсолютной (*Ia*) контрастной чувствительности РСА; *2* – составляющая контрастной чувствительности глаза; *3* – флуктуационная составляющая; *4* – составляющая рассеянного света; *g<sub>z</sub>* – средняя крутизна характеристики регистратора (пунктир) (число наблюдений в РЛИ  $N_c=4$ , полное число наблюдений по площади объекта  $N=N_c \times N_s=100$ )



**Рис. 7.32.** Составляющие контрастной чувствительности РСА при визуальном дешифрировании АРЛИ на простой бумаге (а) и на фотобумаге (б) в зависимости от УЭПР суммарного процесса сигнал+шум:

*I, Ia* – суммарные кривые дифференциальной (*I*) и абсолютной (*Ia*) контрастной чувствительности РСА; *2* – составляющая контрастной чувствительности глаза; *3* – флуктуационная составляющая; *g<sub>z</sub>* – средняя крутизна характеристики регистратора (пунктир) (число наблюдений в РЛИ  $N_c=4$ , полное число наблюдений по площади объекта  $N=N_c \times N_s=100$ )

**Выбор масштаба РЛИ при печати.** Выше были рассмотрены соотношения между полутоновыми градациями отпечатка РЛИ и уровнем сигнала, поступающего на принтер. Для правильного выбора масштаба печати (размера пикселя) рассмотрим физику получения изображения при печати с учетом технических параметров принтера. Разрешающую способность принтера характеризуют числом печатаемых точек, приходящихся на линейный дюйм поверхности – параметр dpi (Dots per inch). В случае черно-белой печати она реализуется путем нанесения на бумагу черных точек, количество которых в одном пикселе изображения на бумаге зависит от заданной плотности изображения в данном пикселе. Так, например, если разрешение принтера составляет 1200 dpi, то размер элементарной точки составляет  $25,4/1200 = 0,0211$  мм (за пределами разрешения глаза). Для обозначения пикселя изображения в отличие dpi используют термин ppi (пикселей на дюйм). Пиксель – это элементарная ячейка мозаики изображения [532/Dpi]. Принтер с разрешением 1200 dpi пригоден для вывода полутоновых изображений с разрешающей способностью до 300 ppi. Стандартный (по умолчанию в программе Word) размер пикселя изображения на бумаге составляет 1/100 дюйма или 0,254 мм. Таким образом, на каждый пиксель изображения приходится  $(0,254/0,0211)^2 = 144$  элементарных пятна, что позволяет отобразить до 145 градаций яркостей. Полное количество пикселей по ширине листа А4 (170 мм без полей) составит 670.

При таких соотношениях на отпечатке будет заметна пиксельная структура снимка. Применительно к использованию отпечатка РЛИ для целей визуального дешифрирования такой размер пикселя является оптимальным, поскольку благодаря ассоциативным возможностям зрительного анализатора эффективно реализуется некогерентное накопление по площади однородных произвольной (связной) конфигурации или периодических структур (опоры линий электропередач). Сохраняется способность выделения и наблюдения малоразмерных объектов при пользовании лупой с 2...5-кратным увеличением.

Для снижения заметности пиксельной структуры и улучшения изобразительных свойств РЛИ следует уменьшать размер пикселя на отпечатке путем его масштабирования. Программа Word позволяет это сделать, меняя размеры изображения, помещенного в полотно, рамку «надпись» или в таблицу.

Следует учитывать, что острота зрения у человека в среднем равна одной угловой минуте. При просмотре изображений на дисплее нужно иметь в виду, что для РС совместимых мониторов разрешение не превышает 96 ppi. Это обстоятельство следует учитывать при создании документов, предназначенных только для экрана, например, компьютерных презентаций, компьютерных заставок, изображений для Web-страниц и т.д.

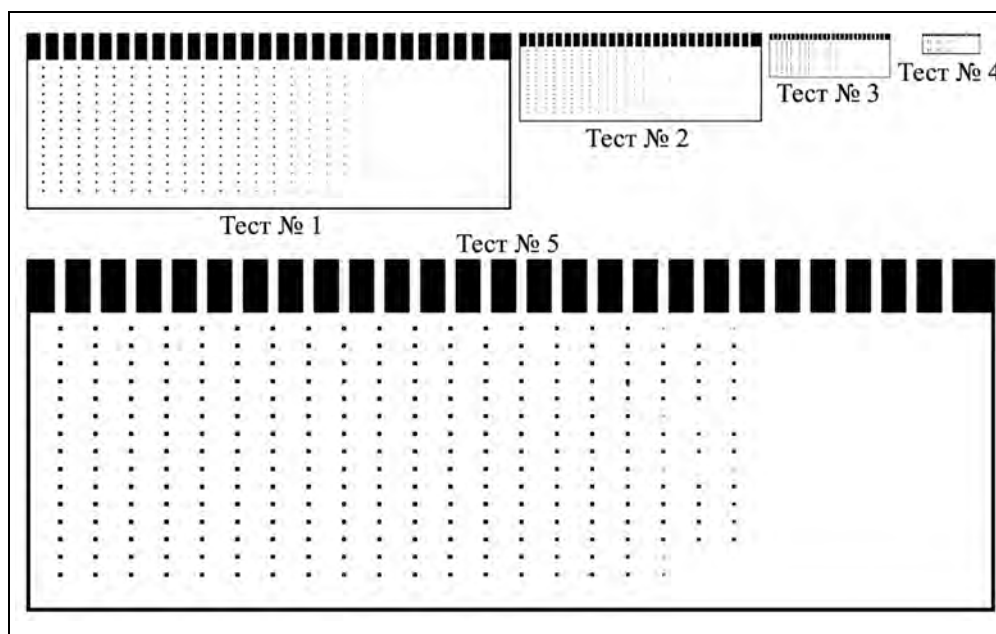
Просмотр фотографий с изображениями высокого качества осуществляется обычно с расстояния 25...30 см. Получается, что с такого расстояния можно различить точку (пиксель) порядка 0,073...0,87 мм. Зачастую, для выполнения полиграфических работ предъявляют требования к разрешающей способности исходных материалов 300 точек на дюйм, при которой размер пикселя составляет 0,085 мм. Это означает, что при использовании принтера с разрешением 600×600 dpi на один



пиксель такого изображения будет приходиться по 4 элементарные точки, а для принтеров с разрешением 1200×1200 или 2400×2400 dpi – по 16 или 64 элементарных точек соответственно. Таким образом, каждый пиксель изображения будет в среднем отображаться соответственно пятью, семнадцатью или шестьюдесятью пятью градациями – от полного отсутствия точек в пикселе (белое поле) до полной заливки (черное поле).

В отличие от принтеров, у которых размер элементарной точки постоянный, при обычной типографской печати размер точки изображения изменяется (от 0,05 до 1 мм) в зависимости от яркости исходного рисунка.

Для исследований микроструктуры отпечатка полутоновых пикселей использовалась точечная мира, состоящая из одиночных пикселей с яркостью от 255 ед. (белый цвет, совпадающий с фоном) до 0 (черная отметка), вид которой представлен на рис. 7.33. Мира имеет несколько полей, сформированных из стандартного BMP файла (Тест №1 в левой верхней части миры) с точечными отметками в один пиксель. Тесты №2–№4 уменьшены в 2, 4 и 8 раз, а тест №5 увеличен в 2 раза путем изменения размера рисунка при вставке его в документ Word. При этом программа Word интерполирует (экстраполирует) размеры пикселя до требуемого масштаба. Следует отметить, что в электронной версии документа Word размеры всех тестов одинаковы (273×100 пикселей) и одинаковым образом могут быть экспортированы в программы Photoshop или Paint.



**Рис. 7.33.** Точечная мира для проверки воспроизведения пикселей при печати РЛИ.  
Диапазон яркостей 0...255, линейный закон  
(масштабы тестов: исходный М1:1 (№1); М1:2 (№2); М1:4 (№3); М1:8 (№4); М2:1 (№5);  
размер пикселя исходной миры – 0,21×0,21 мм)

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

Микроструктура фрагментов (начало, середина, конец) тестов миры, отпечатанной на бумаге, представлена на рис. 7.34. Микрофотографии отпечатков миры получены с помощью цифрового USB-микроскопа PolyPower. В табл. 7.7 приведены сводные данные по размерам пикселя, среднему числу яркостных градаций в пикселе в зависимости от разрешающей способности принтера.

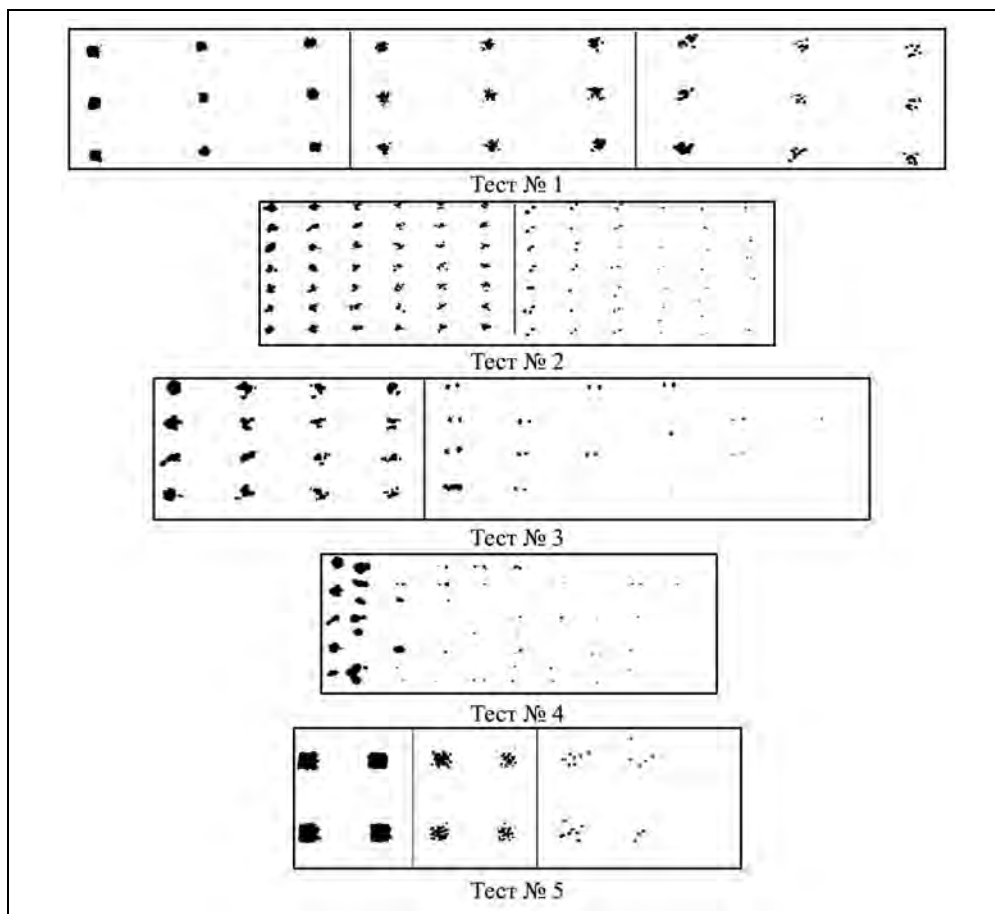


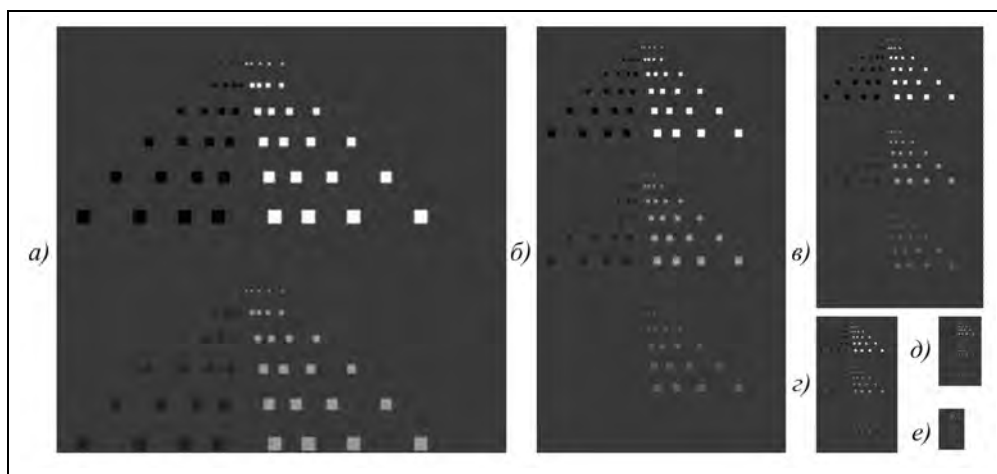
Рис. 7.34. Микрофотографии фрагментов тестов точечной миры (рис. 7.33)

Таблица 7.7. Число отображаемых градаций в пикселе РЛИ в зависимости от разрешения принтера в dpi

Параметр	Размеры пикселя, мм	
	0,254×0,254	0,085×0,085
Число градаций в пикселе изображения при разрешении принтера:		
600 dpi	37	5
1200 dpi	145	17
2400 dpi	577	

Рассмотрим некоторые особенности, которые следует учитывать при печати РЛИ. Так же, как и в случае отображения РЛИ на дисплее, имеем две ситуации – печать РЛИ для презентаций с наилучшими изобразительными свойствами и для дешифрирования, когда требуется полнота воспринимаемой информации. Для определенности зададим формат листа А4, для которого максимальные размеры изображения составляют  $170 \times 260 \text{ мм}^2$ . Разрешающая способность широко распространенных принтеров составляет 600 dpi, 1200 dpi и более, что соответствует диаметру пятна  $0,021 \dots 0,042 \text{ мм}$  и менее на пределе зрительного восприятия с расстояния наилучшего видения. Число таких точек на ширину листа бумаги составит  $4050 \dots 8100$ , а по высоте  $5500 \dots 11000$  точек, что приводит к большому объему изображения ( $22 \dots 88$  мегапикселей). Практика показывает, что без большой потери качества можно уменьшить размер РЛИ для печати до 1200 точек на строку (не более 2 Mpix для полного изображения на страницу). Следует иметь в виду, такие программы, как Word, Photoshop и ряд других, для получения требуемого размера отпечатка масштабируют исходное изображение методом квадратичной или бикубической интерполяции. Исходный кадр сохраняется в файле Word и может быть преобразован в исходный размер. Такое свойство не имеет место при преобразовании файла из программы Word в PDF.

Возможности преобразования масштаба при вставке файла изображения в документ Word иллюстрирует рис. 7.35. На нем изображены полутоновая мира с исходным размером  $300 \times 256$  пикселей (рис. 7.35, б–д), семь уровней яркости – средняя яркость и по 3 градации светлых и темных полей. Размеры полей от  $1 \times 1$  до  $6 \times 6$  пикселей, а на увеличенном фрагменте мира – до 11 пикселей. Масштабы мир на рис. 7.35 – от  $M1,8:1$  до  $M1:10$ .



**Рис. 7.35.** Полутоновая мира для проверки возможностей обнаружения и разрешения отметок при визуальном дешифрировании отпечатанного на бумаге изображения: исходный контраст полей относительно среднего уровня (25 % от максимального белого), темных – 100; 50 и 25 %, светлых – 100; 200 и 300 % (максимальный уровень); масштабы изображений: *a* –  $1,8:1$ , *б* –  $1:1$ , *в* –  $1:1,5$ , *г* –  $1:3,1$ , *д* –  $1:6$ , *е* –  $1:10$ ; размер пикселя исходной мира (*б*) –  $0,21 \text{ мм}$

При дешифрировании невооруженным глазом тестовые поля с полным контрастом обнаруживаются и различаются при размере пятна на бумаге, равном 0,13 мм (рис. 7.35,з), для темных, и для светлых полей.

Проведенный в данном разделе анализ и рассмотренные методики инструментального контроля параметров отображения РЛИ позволяет сделать следующие **выводы**:

- при отображении РЛИ на дисплее для целей его дешифрирования должен использоваться весь арсенал средств для согласования параметров изображения на экране с характеристиками зрительного анализатора. На первом этапе общего ознакомления с РЛИ и поиска фрагментов для детального анализа целесообразно на вход дисплея подавать амплитудное РЛИ, которое получено после некогерентного накопления первичного ЭРЛИ с числом наблюдений ~4 и последующим извлечением квадратного корня из отсчетов ЭРЛИ для преобразования его в АРЛИ. В программном обеспечении рабочего места оператора должны быть предусмотрены возможности изменения масштаба РЛИ на экране, яркости и контрастности (гамма-характеристики) РЛИ, а также выполнения процедур сглаживания и повышения резкости. Все указанные процедуры входят в комплект специализированных программ обработки изображений или могут быть выполнены с помощью программ Photoshop, MATLAB [70, 188]. Дополнительно могут привлекаться специальные процедуры некогерентного накопления (в том числе и с использованием вейвлет-преобразований), текстурного анализа и автоматической сегментации, а также измерительные методы дешифрирования, основанные на оценке гистограмм распределения яркости изображений по обнаруженным объектам. Кроме сглаженного РЛИ может потребоваться первичное РЛИ с одним наблюдением;
- из-за ограниченной контрастной чувствительности зрительного анализатора и малого динамического диапазона средств отображения РЛИ необходимо в процессе дешифрирования РЛИ перенастраивать параметры отображения РЛИ для их адаптации к визуальному восприятию. Эти изменения должны реализовываться при регистрации подготовленных частных материалов (фрагментов РЛИ) для архивирования и формирования отчетного документа (доклада). На рис. 7.36 показаны варианты такой регистрации – обзорного РЛИ с низким пространственным и радиометрическим разрешениями и, по возможности, с расширенным динамическим диапазоном, РЛИ с повышенным разрешением, детальные РЛИ, позволяющие классифицировать объекты. Обзорный снимок и его укрупненный фрагмент (рис. 7.36,а,б) позволяют вести общую идентификацию объектов: морская поверхность, остров, вулкан, цуг волновых возмущений на морской поверхности в верхней правой части снимка, одиночные волновые образования, надводная обстановка. Малые фрагменты РЛИ позволяют выделить на РЛИ характерные объекты (например, движущееся судно с кильватерным следом (рис. 7.36,в), который может быть подчеркнут специальной фильтрацией вдоль следа (motion blur), само судно малого тоннажа (рис. 7.36,з), суда различного класса (рис. 7.36,д), причем за малым судном виден длинный кильватерный след;

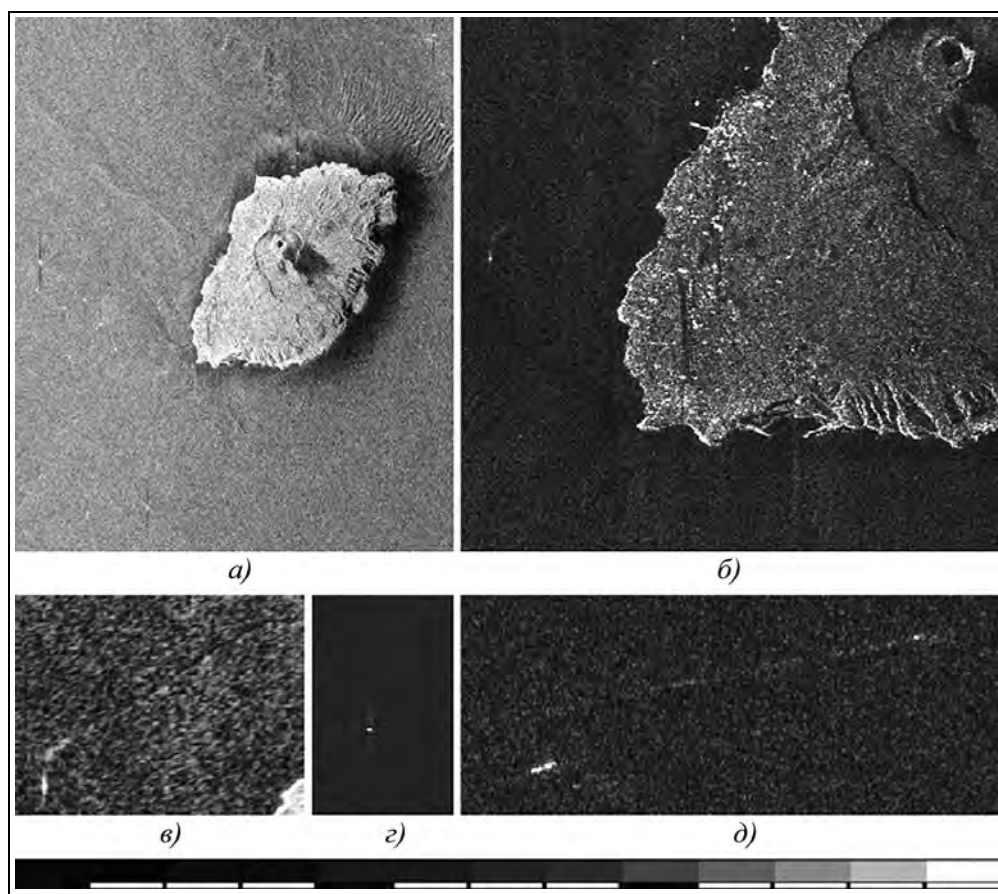
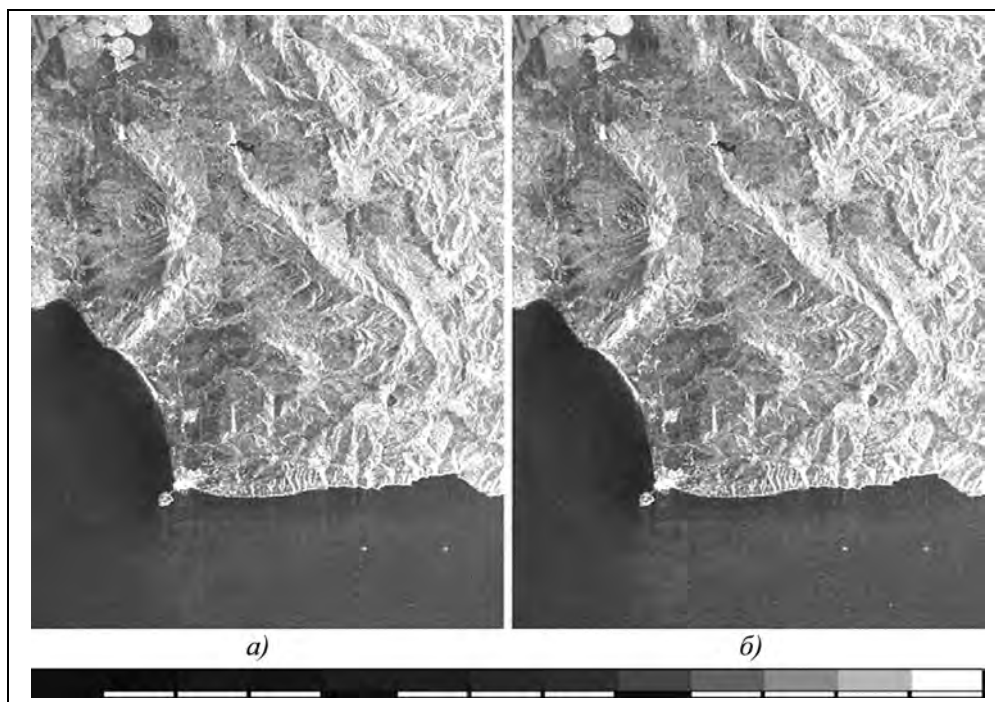


Рис. 7.36. Вариация режимов отображения на бумаге с адаптацией к зрительному восприятию информации (Японское море, о.Осима, РСА «Меч-КУ»; КА «Алмаз-1», виток 2024в)

- несмотря на стремительное развитие вычислительной техники, производительности компьютеров и средств хранения информации сохраняет актуальность вопрос об объеме файла отчетной документации, в которую (в том числе в электронном виде) требуется помещать множество детальных радиолокационных снимков с большим объемом мегапикселей. Поскольку выпускаемые документы предназначены для их зрительного восприятия, эффективно для снижения объема документа применить сжатие РЛИ, преобразуя их из форматов BMP, TIFF, GeoTIFF в формат JPEG, который адаптирован к зрительному восприятию полутоновых изображений. Уменьшение размера файла программой Photoshop в 4...5 раз с качественным воспроизведением снимка обеспечивается при средней степени сжатия с уровнем 7. Приведенные на рис. 7.37 исходное РЛИ в формате BMP с размером файла 450 Кб и преобразованное в формат JPEG с уровнем сжатия 2 низкого качества и размером

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

файла 105 Кб практически не отличаются. При сжатии с уровнем 7 среднего качества размер файла составляет 160 Кб. Приведенные рекомендации по сжатию не распространяются на растровые изображения, содержащие графики, структурные схемы, качество которых при сжатии алгоритмом JPEG снижается из-за появления артефактов.



**Рис. 7.37.** РЛИ размером 0,450 Mpix в формате BMP, размер файла 450 Кб (а) и преобразованное в формат JPG, низкое качество, уровень 2, размер файла 105 Кб (Пролив Гибралтар, РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1», виток 2005н)

Полученные таким образом отпечатки фрагментов РЛИ и файлы изображений в однобайтовом формате (uint8), помимо использования в отчетных документах, помещаются в банк данных радиолокационной фоноцелевой обстановки в легко воспроизводимой для просмотра справочной описательной части, прилагаемой к основной информации в виде комплексных изображений в формате int16 или плавающем формате для их использования в процедурах инструментальной обработки. Удобно также хранение комплексных радиолокационных данных в виде амплитудных (АРЛИ) и фазовых (ФРЛИ) изображений в форматах uint16 или 16-разрядном GeoTIFF. Фазу в этих форматах записывают как  $\varphi_{\text{uint16}} = (\varphi_{\text{rad}} + \pi)32768/\pi$ , где  $\varphi_{\text{rad}}$  – значения фазы в радианах в интервале  $\pm\pi$ .

Расширение номенклатуры решаемых задач вторичной обработки радиолокационной информации, рассмотренные в гл. 9, неизбежно приведут к разнообразию режимов отображения РЛИ на дисплее и бумажных носителях, при оптимизации которых могут быть учтены рекомендации, сформулированные в данной главе.

## 7.5. Характеристики цветного и псевдоцветного отображения РЛИ

В предыдущих подразделах рассматривались вопросы отображения и восприятия монохромного черно-белого изображения. Между тем, современные методы цветного отображения радиолокационной информации и цветная печать РЛИ позволяют расширить динамический диапазон воспринимаемых радиояркостей и улучшить контрастную чувствительность зрительного анализатора. В ряде случаев цветная индикация является незаменимым способом представления и анализа получаемых данных.

Цветное отображение на дисплее и на бумаге характеризуется разными принципами: на дисплее происходит аддитивное суммирование цветов. Палитра основных цветов RGB (Red – красный, Green – зеленый и Blue – синий) и значения яркости (Intensity) могут быть представлены в виде трехмерной системы координат (определяющей куб цветовых векторов), в которой каждая из координат отражает вклад каждой составляющей в результирующий цвет в диапазоне от нуля до максимального значения, равного единице или 255 ед., а яркость, характеризующая оттенки серого (три цветовых составляющих, яркость каждой из которых равна 100 %) является множителем этих составляющих.

Изображение на бумаге наблюдают в отраженном свете. Из белого цвета вычитаются определенные цвета, соответствующие подавлению спектральных составляющих широкополосного облучения от источника белого цвета. Палитра субтрактивных дополнительных цветов CMYK (Cyan – голубой, Magenta – пурпурный, Yellow – желтый и добавленный для коррекции цветовой палитры черный цвет – Black). Обе палитры RGB и CMYK однозначно связаны между собой, преобразование из одной в другую происходит автоматически в зависимости от типа отображающего устройства. При необходимости возможно формирование произвольных цветовых палитр.

Широкий набор цветовых палитр, которые можно применять для вывода РЛИ на дисплей, содержится в программах Photoshop, MATLAB и других. Их можно разделить на два класса – совместимых с черно-белой (Grayscale) палитрой и несовместимых, имеющих вид радуги, в которой яркость постоянна, но изменяется соотношение цветовых составляющих. При печати выполненных в такой палитре изображений на черно-белом принтере серая палитра будет трудно понимаемой. Это объясняется тем, что вклад цветовых составляющих в яркость изображения разный (уравнение яркости)

$$E_Y = 0,3E_R + 0,59E_G + 0,11E_B, \quad (7.70)$$

где  $E_Y$  – интенсивность суммарного изображения;  $E_R, E_G, E_B$  – интенсивности цветовых составляющих RGB-изображения.

Когда решается задача расширения динамического диапазона при восприятии монохромных РЛИ, то применяют псевдоцветную индикацию РЛИ. Сложность состоит в том, что палитры, хорошо воспринимаемые в цвете, могут исказить градиционную характеристику при черно-белой монохромной печати РЛИ. Так, например, не применима для вывода РЛИ при черно-белой печати известная, хорошо

## Глава 7. Обработка и регистрация радиолокационных изображений

различаемая в цвете, шкала глубин и высот, используемая в цветных картографических материалах.

Создание оптимальной палитры, которая одинаково или близко воспринимается и в цветной и в черно-белой печати, является достаточно сложной задачей. Приблизительно она решалась при подготовке рукописи Книги к печати, электронная версия которой использует цветные иллюстрации, в том числе РЛИ в псевдоцветной палитре. Такие РЛИ представлены, в частности, на рис. 2.1, 2.26 и 3.7. На практике для вывода РЛИ в черно-белом изображении применяют палитру в синих тонах на участках малой яркости с переходом к зеленому и желтому при увеличении яркости до 100 %. Псевдоцветные изображения этих снимков приведены на цветной вкладке в конце книги (рисунки соответственно Ц1, Ц3 и Ц2).

Формирование такой палитры легко реализуется в программах Photoshop, MATLAB и специализированных пакетах, предназначенных для обработки РЛИ. Ожидаемое расширение динамического диапазона РЛИ – в 2...2,5 раза (в децибелах) или улучшение контрастной чувствительности (радиометрического разрешения) при визуальном дешифрировании РЛИ. Вместе с тем, как уже отмечалось, при псевдоцветной индикации ухудшаются ассоциативные свойства зрительного анализатора, что снижает эффективность некогерентного накопления по площади анализируемого объекта на РЛИ.

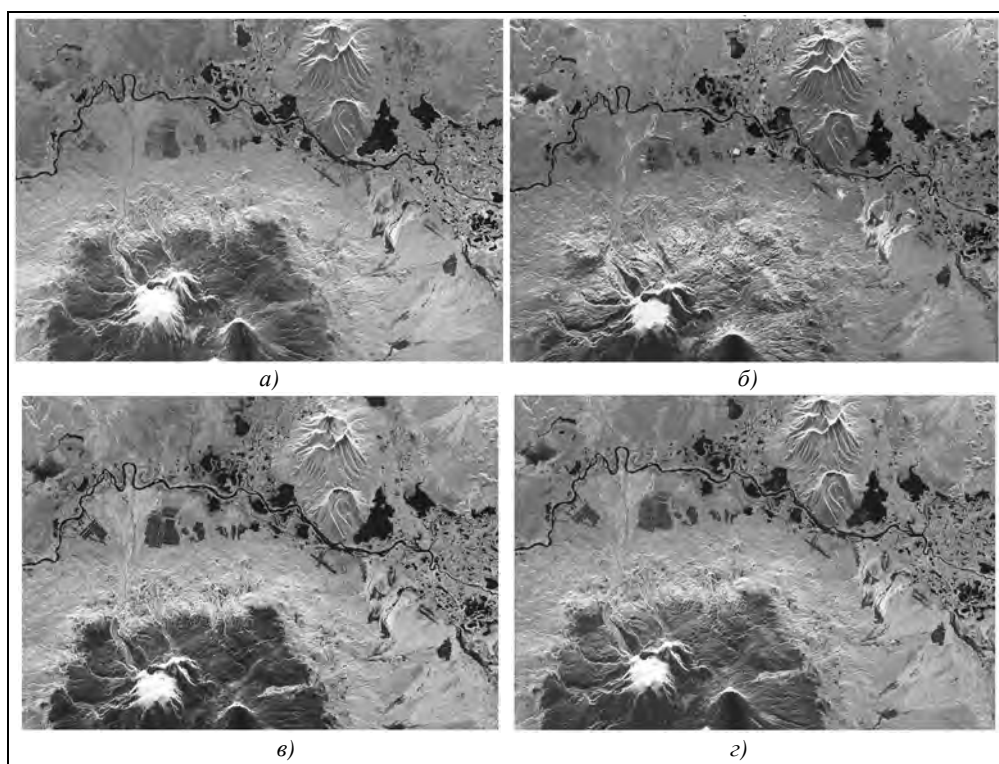
Кроме задачи улучшения дешифрируемости монохромных РЛИ цветная индикация может применяться для совмещенного отображения материалов поляриметрического, многочастотного или многовременного зондирования. Каждый из входящих материалов монохромный, а композитное РЛИ делается цветным. На рис. 7.38 приведено композитное РЛИ вулкана Ключевская сопка, полученное с помощью РСА SIR-C/X-SAR КК Endeavour в октябре 1994 г. на следующий день после начала извержения вулкана [522]. Первая фаза извержения характеризовалась выделением газа, пара и пепла до высоты 20 км, а также двумя лавовыми потоками.

Иллюстрация формирования композитных РЛИ по монохромным составляющим дана на рис. 7.38 (в черно-белом отображении), а также на рис. Ц.4 и Ц.5 цветной вкладки. Монохромные составляющие РЛИ: красный (рис. 38,а и Ц.4R) – L-диапазон ГГ; зеленый (рис. 7.38,б и Ц.4G) – L-диапазон ГВ; синий (рис. 7.38,в и Ц.4B) – C-диапазон ГВ. Композитное однодиапазонное двухканальное РЛИ – L-ГГ + L-ГВ приведено на рис. 7.38,г (черно-белое отображение) и на рис. Ц. 5,б

На РЛИ река Камчатка протекает по горизонтали в центре снимка. На правом склоне вулкана видны два желто-зеленых (светлых – на ч/б снимках см. рис. 7.38,в,г) ручейка свежей лавы. Цветовые различия позволяют оценить состояние посевов вдоль реки Камчатка, неизмеримо отчетливее выделяются геологические структуры на склонах вулкана.

При преобразовании монохромных составляющих в композитное цветное РЛИ серые изображения составляющих преобразуют в RGB (используя, например, Photoshop), обнуляют ненужные цветовые составляющие, корректируют яркости парциальных РЛИ в соответствии с формулой (7.70), а затем собирают композитное RGB изображения по слоям и сохраняют его как однослойное цветное в нужном формате (TIFF, JPG и др.).





**Рис. 7.38.** Композитное (в оригинале – цветное) и составляющие поляриметрических радиолокационных изображений вулкана Ключевская сопка (Камчатка, Россия), полученные PCA SIR-C/X-SAR КК Endeavour [522]:  
*a* – композитное РЛИ; *б* – С-диапазон ГВ; *в* – L-диапазон ГГ; *г* – L-диапазон ГВ

Декомпозицию выполняют в обратном порядке, путем сохранения изображений каждого из каналов RGB при обнулении двух других. После этого делают преобразование каждой составляющей в монохромное РЛИ и выполняют коррекцию яркости монохромных составляющих до 100 %.

Использование аппаратно-программных средств общего и специального применения для работы с материалами радиолокационной съемки позволяет адаптировать параметры отображаемых РЛИ к свойствам зрительного анализатора и обеспечить характеристики обнаружения объектов на РЛИ, близкие к характеристикам оптимальной фильтрации по критерию максимума правдоподобия. Наличие встроенных процедур измерения параметров РЛИ и статистической обработки, а также средств автоматизации процесса дешифрирования в комплексе рабочих мест операторов позволяет обеспечить высокую достоверность интерпретации данных и оперативность получения информации по результатам радиолокационного зондирования

---

## Глава 8

### ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ РСА

#### 8.1. Учет влияния нелинейностей в тракте РСА

Информативность РСА характеризуется набором основных технических параметров и уровнем помех, вызванных различными искажающими воздействиями – ошибками траекторных изменений, нестабильностями трассы распространения и аппаратуры, боковыми лепестками функции неопределенности зондирующего сигнала, а также нелинейностями сквозного тракта РСА

##### Источники нелинейностей в тракте РСА

Сигнал, отраженный от местности, характеризуется большим динамическим диапазоном, определяемым различием УЭПР наблюдаемой местности. Проходя через тракт РСА, сигнал может подвергаться нелинейным искажениям и ограничению, определяемым формой амплитудной характеристики аналоговых устройств РСА или ограничением разрядной сетки в цифровых модулях синтеза РЛИ. В некогерентных РБО влияние нелинейностей сказывается на изменении амплитудных соотношений сигнала, принимаемого от разных участков местности и целей. В РСА влияние таких нелинейностей сказывается при отображении полученных в результате синтеза АРЛИ или ЭРЛИ (см. гл. 7).

В данном разделе анализируются нелинейные искажения радиоголограммы. Их воздействие на выходное изображение гораздо сложнее. Нелинейности приводят к появлению гармоник сигнала и комбинационных частот между сигналами. Действительно, если представить амплитудную характеристику степенным рядом, а сигнал представлять в виде суммы двух или более синусоидальных составляющих, то в суммарном колебании появятся степени составляющих входного сигнала

$$U_{\text{out}}(t) = (U_1 \sin \varphi_1 + U_2 \sin \varphi_2)^n = U_1^n \sin^n \varphi_1 + n(U_1 \sin \varphi_1)^{n-1} U_2 \sin \varphi_2 + \dots, \quad (8.1)$$

где  $\varphi = \varphi(t)$  – зависимость фазы от времени;

$$\varphi_1 = \Omega_1 t + \varphi_{10}; \quad \varphi_2 = \Omega_2 t + \varphi_{20}. \quad (8.2)$$

Здесь  $\Omega_1, \Omega_2$  – круговые частоты сигналов;  $\varphi_{10}, \varphi_{20}$  – начальные фазы.

Степени сигналов дают гармоники  $n\Omega_1$  и  $n\Omega_2$ ; произведения составляющих – суммарные и разностные частоты  $n\Omega_1 + m\Omega_2$  и  $n\Omega_1 - m\Omega_2$ .

По характеру воздействия следует рассматривать два функциональных звена:

1) радиотракт до фазового детектора приемника. Основным источником искажений являются нелинейности амплитудных характеристик усилителя промежуточной частоты (УПЧ), в том числе наличие встроенных в УПЧ ограничителей сигналов, необходимых для исключения перегрузки в каскадах усиления;

2) видеотракт, включающий фазовые детекторы, видеоусилители, аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), модули сжатия и восстановления динамического диапазона сигнала. В РСА первого поколения к видеотракту относились фоторегистраторы радиоголограммы.

Влияние гармоник и комбинационных частот разное в радиотракте и видеотракте. Различие процессов в этих звеньях определяется тем, что в радиотракте нелинейности изменяют амплитуду сигнала, сохраняя ее фазу. В видеотракте нелинейности воздействуют на действительную и мнимую составляющие раздельно, векторная сумма которых формирует комплексный сигнал с изменениями амплитуды и фазы.

В РСА первого поколения использовали оптический синтез апертуры с записью радиоголограммы на фотопленку с помощью однострочного индикатора и были сложности получения сквозной линейной характеристики с учетом зависимости яркости индикатора от амплитуды входного сигнала, коэффициента контрастности и чувствительности фотопленки, а также параметров фотопроцесса. В современных РСА, использующих цифровое сжатие по длительности и азимуту, а также цифровую передачу информации по радиолинии, нелинейности в видеотракте определяются амплитудными характеристиками видеоусилителей в каналах действительной и мнимой составляющих, разрядной сеткой АЦП, разрядностью радиолинии передачи данных, преобразованиями при сжатии динамического диапазона до передачи и восстановления информации после ее приема, а также разрядностью вычислений при синтезе РЛИ.

Характерная особенность РСА состоит в том, что выходной сигнал формируется путем суммирования многих отсчетов входного сигнала – это когерентное суммирование после умножения на фазовый множитель. При этом сигнал от цели суммируется когерентно, его амплитуда умножается на  $k_c \times N_x$ , шум приемника накапливается некогерентно, как  $\sqrt{k_c \times N_x}$ , а сигналы от других целей или элементов фона, смещенных по дальности или азимуту относительно настройки фильтра обработки, дают результат, близкий к нулю.

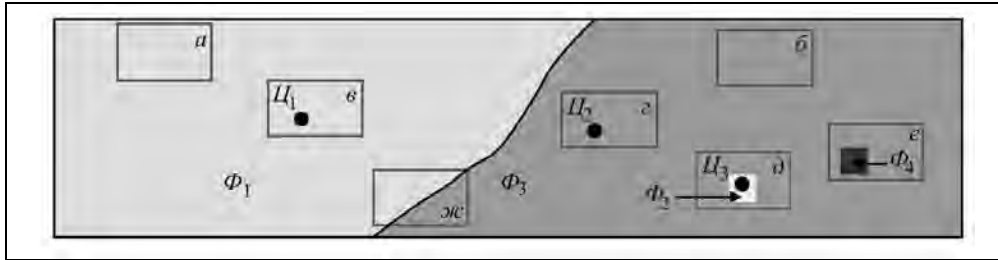
### **Энергетические соотношения для фона и целей**

Процесс, действующий в приемном тракте, представляет собой сложение множества сигналов, отраженных от облучаемой поверхности, и шума приемника. Принимаемые сигналы в РСА представляют собой нестационарный процесс, определяемый различным уровнем отражения от подстилающей поверхности разного характера, отличающейся по УЭПР, и в разной конфигурации (море, равнина, леса, горы, города). Для исследований прохождения сигналов через тракт обычно рассматривают упрощенную стационарную модель отражения от местности (с переменными параметрами для разных ситуаций) или квазистационарную – с малыми неоднородностями. После оптимизации характеристик тракта для стационарного процесса рассматривают явления на резких перепадах входного процесса – границах море/суша, наблюдение мощных целей (мосты, промышленные сооружения, корабли) на слабом фоне.

В общем виде модель местности можно характеризовать функцией радиолокационного рельефа (ФРР) – произвольной неотрицательной функцией, одномер-

## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

ной  $\Phi(X)$ ,  $\Phi(R)$  или двумерной  $\Phi(X,R)$ , где  $R$  – наклонная дальность. Типовая ситуация при радиолокационном наблюдении показана на рис. 8.1. Для простоты будем рассматривать наклонную, а не горизонтальную дальность. Влияние нелинейностей ограничено локальными зонами, которые будем называть *мгновенной областью облучения*, как это обозначено прямоугольниками на рис. 8.1.



**Рис. 8.1.** Типичные объекты и ситуации при радиолокационном наблюдении:

$\Phi_1$  – «море»,  $\sigma^0_1 = 0$ ;  $\Phi_2$  – «озеро»,  $\sigma^0_2 = 0$ ;  $\Phi_3$  – «луг»,  $\sigma^0_3 = 0,01$  (–20 дБ);  $\Phi_4$  – «лес»,  $\sigma^0_4 = 0,032$  (–15 дБ);  $U_1$  – «корабль»,  $\sigma_1 = 10000 \text{ м}^2$ ;  $U_2$  – «трактор»,  $\sigma_2 = 50 \text{ м}^2$ ;  $U_3$  – «лодка»,  $\sigma_3 = 50 \text{ м}^2$  (прямоугольниками *а–ж* отмечены положения «мгновенной области облучения»)

Мгновенная область облучения ограничена по наклонной дальности длительностью зондирующего ЛЧМ-импульса

$$R_{\text{imp}} = c\tau / 2, \quad (8.3)$$

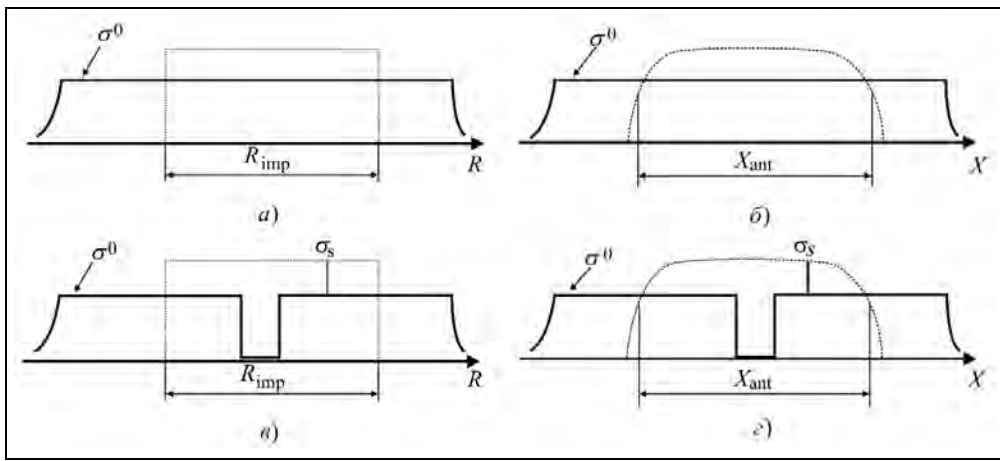
а по азимуту – шириной зоны облучения антенны

$$X_{\text{ant}} = R\lambda / D_{\text{xant}}. \quad (8.4)$$

Функцию радиолокационного рельефа (ФРР) рассматривают как стационарную (участки: *а* – «море», *б* – «луг») или квазистационарную с локальными неоднородностями: включением целей (*в*, *г*) или участков с отличающейся УЭПР (*д* – «озеро» или *е* – «лес»), что допустимо, если общая мощность сигнала от этих участков мала по сравнению с мощностью суммарного процесса шум+фон. Особый случай для анализа представляет существенно нестационарная ФРР на границах участков с разной УЭПР, показанная на рис. 8.1,*ж*. На рис. 8.2 показаны сечения ФРР по наклонной дальности и по азимуту.

Для исследуемых явлений суммарный процесс в радиотракте может рассматриваться как нормальный стационарный процесс, спектр которого по дальности определяется суммой спектра процесса, принятого от фона местности  $S_f$  (ширина спектра равна полосе зондирующего импульса  $\Delta F$ ), и спектра шумов приемника (с полосой  $\Delta F_n$ , которая обычно несколько превышает полосу зондирующего импульса, чтобы не ухудшать разрешающей способности РСА). Спектр процесса по азимуту определяется суммой спектра доплеровских частот сигнала ( $\Delta F_{\text{Доп}}$ ) и спектра некоррелированных выборок шума приемника с частотой повторения зондирующих импульсов  $F_p$  (ширина спектра шума  $\Delta F_n = F_p$ ). Вид сечений спектров по дальности и азимуту для суммарного процесса в радиотракте представлен на рис. 8.3.

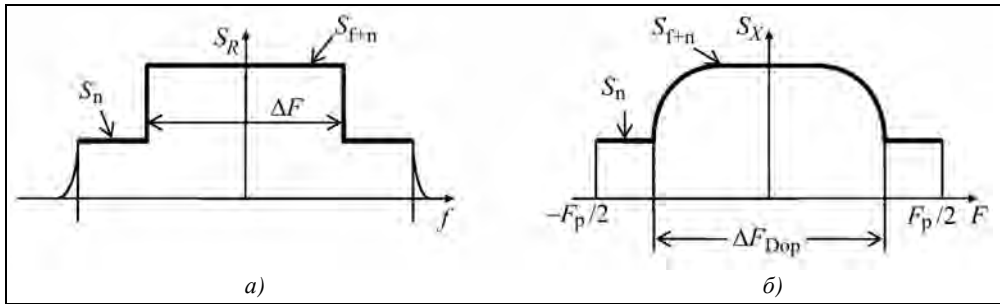
**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**



**Рис. 8.2.** Сечения функции радиолокационного рельефа,

используемые для анализа прохождения сигналов через тракт РСА:

*a* – стационарная ФРП по дальности; *б* – стационарная ФРП по азимуту; *в* – квазистационарная ФРП с малыми неоднородностями (цель  $\sigma_s$  и провал в УЭПР) по дальности; *г* – квазистационарная ФРП с малыми неоднородностями (цель  $\sigma_s$  и провал в УЭПР) по азимуту



**Рис. 8.3.** Сечения спектра процесса в радиотракте по дальности (*a*) и азимуту (*б*)

Энергетические соотношения для процесса на входе приемного тракта характеризуются мощностями шума, фона и цели, определяемыми уравнением дальности (раздел 3.4). ЭПР фона  $\sigma_f$  вычисляют через УЭПР фона  $\sigma_f^0$  и площадь мгновенной области облучения, пересчитанной к горизонтальной дальности

$$\sigma_f = \frac{\sigma_f^0 c \tau_{\text{imp}} R \lambda}{2 \sin \gamma_i D_{\text{xant}}} \quad (8.5)$$

По значениям  $\sigma_f$  для фона и  $\sigma_s$  для цели из уравнения дальности находят отношение фон/шум  $Q_{1f}$  и сигнал/шум  $Q_{1s}$  на выходе линейной части приемника (см. обозначения раздела 3.4). Эти отношения определяют отношения спектральных плотностей мощности шума  $S_n$  и суммарного процесса фон+шум  $S_{f+n}$  (а также для фона  $S_f = S_{f+n} - S_n$ ).

## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

Параметры сигнала на выходе тракта РСА после сжатия по дальности ( $k_c$ ) и азимуту ( $N_{\text{synt}}$ ) будем оценивать отношением мощностей на участке фона к мощности шумов приемника и отношением сигнал/шум+фон для точечной цели. Отношение сигнал/шум+фон для точечной цели на выходе РСА для линейного тракта РСА имеет вид

$$Q_{s/n+f} = \frac{Q_{s.out} P_n}{P_f + P_n}, \quad (8.6)$$

где  $Q_{s.out} = Q_{s1} k_c N_{\text{synt}}$  – отношение сигнал/шум на выходе РСА после сжатия импульсов по длительности и синтеза апертуры.

Наблюдаемость фона и, в частности, элементов с малым отражением («озеро») в окружении интенсивного фона определится отношением суммарной мощности на участке фона к мощности в провале функции рельефа  $P_{n0}$ . Энергетические соотношения для фона можно назвать «динамическим диапазоном по фону», определяющим контраст элементов фона на выходе РСА

$$D_f = \frac{P_f + P_{n0}}{P_{n0}}, \quad (8.7)$$

где  $P_{n0}$  представляет собой сумму мощности шума приемника, доли мощности от соседних элементов фона, попавших в боковые лепестки импульсной реакции РСА, мощности помех от неоднозначности функции неопределенности и продуктов нелинейности.

### Нелинейности в радиотракте РСА

Примем, что нелинейность в радиотракте относится только к последнему его каскаду, коэффициент передачи которого в линейной части амплитудной характеристики равен 1. Для примера рассмотрим приведенную на рис. 8.4 типичную амплитудную характеристику приемника (по огибающей), имеющую линейный участок до 0,7 В, плавно переходящий в ограничение («мягкое» ограничение) с максимальным уровнем 1 В.

В суммарном процессе, действующем в тракте РСА и включающем шум приемника, фон местности в пределах мгновенной области облучения и точечные цели, можно выделить сигнал от одной из точечных целей (или от элемента фона с размерами  $\rho_x \times \rho_y$ ) и рассматривать его прохождение через тракт совместно с суммарным процессом. На входе нелинейности действует случайный нормальный процесс, шум плюс фон, с мощностью

(дисперсией)  $\sigma_{f+n}^2$ , амплитуда которого распределена по рэлеевскому закону

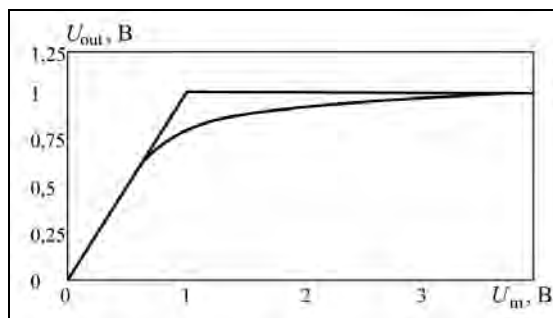


Рис. 8.4. Амплитудная характеристика приемника

$$p(U) = \begin{cases} \frac{U}{\sigma_{f+n}^2} e^{-U^2/2\sigma_{f+n}^2}, & U > 0 \\ 0, & U \leq 0 \end{cases}. \quad (8.8)$$

Дисперсия процесса на входе нелинейного звена определяется мощностью шума в выходном каскаде приемника и отношением фон/шум (влиянием целей пренебрегаем)

$$\sigma_{f+n}^2 = \sigma_f^2 + \sigma_n^2 = \sigma_n^2 (1 + Q_{if}). \quad (8.9)$$

Процесс на входе нелинейности представим в виде суммы двух составляющих: малой – сигнал от цели или элемента фона, и большой, определяемой суммарным процессом фон+шум. Сигнал от цели (и от отдельных элементов фона) будет меняться по регулярному ЛЧМ-закону. Можно рассмотреть малый отрезок ЛЧМ-сигнала с постоянной частотой (или даже с нулевой частотой, т.е. неподвижный вектор с постоянной фазой). Суммарный процесс будет случайной величиной от отсчета к отсчету. Векторная диаграмма процесса показана на рис. 8.5. При наличии нелинейности в радиотракте изменяется амплитуда выходного процесса, а фаза передается без изменений.

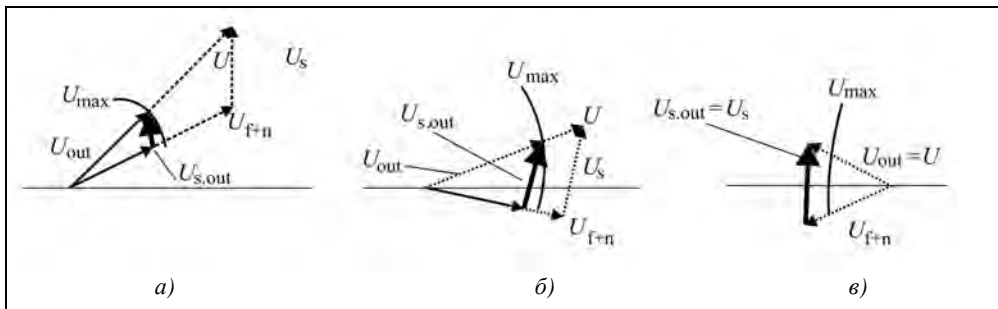


Рис. 8.5. Векторные диаграммы процесса шум+фон  $U_{f+n}$  разного уровня и фазы, сигнала от цели  $U_s$  и суммарного процесса  $U$  при наличии нелинейности в радиотракте (ограничение на уровне  $U_{max}$ ):

$a$  – глубокое ограничение;  $b$  – слабое ограничение;  $e$  – ограничение отсутствует

Строгий анализ прохождения сигналов и шумов через нелинейность может быть выполнен вычислением корреляционных функций входного сигнала путем разложения их в ряд по полиномам Лагерра для радиотракта или полиномам Эрмита для видеотракта и представления выходного сигнала в виде рядов [136]. Для случая широкополосного сигнала с последующим суммированием многих отсчетов задача упрощается, так как входной процесс для стационарной ФРП по азимуту (или дальности) можно аппроксимировать в виде  $\delta$ -функции с шириной  $1/\Delta F_{Dop}$  (или  $1/\Delta F$  по дальности), а для квазистационарной – в виде разности  $\delta$ -функции и малой составляющей, являющейся преобразованием Фурье от дополнения ФРП до единицы.

Амплитуда цели в каждом отсчете будет изменяться (уменьшаться) обратно пропорционально изменению амплитуды суммарного процесса на выходе нелиней-

## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

ности. Амплитуда цели на выходе РСА будет пропорциональна средней крутизне  $M_S$  и числу когерентно накапливаемых отсчетов по дальности  $k_c$  и по азимуту  $N_{\text{synt}}$

$$U_{s,\text{out}} = U_s k_c N_{\text{synt}} M_S. \quad (8.10)$$

Мощность цели

$$P_{s,\text{out}} = P_n Q_{s1} M_S^2 k_c^2 N_{\text{synt}}^2. \quad (8.11)$$

Энергетические соотношения на выходе РСА при наблюдении цели и контрастов фона определяются составляющими мощностей цели  $P_{s,\text{out}}$ , фона  $P_f$ , а также мощностями шумов  $P_n$ , включающих дополнительный шум. Эти составляющие выражаются через среднюю крутизну и второй момент амплитудной характеристики тракта. Суммарная мощность процесса на выходе РСА после сжатия по длительности и когерентного накопления по азимуту

$$P_{\text{out,nl}} = P_{f,\text{nl}} + P_{n,\text{nl}} = D_U (1 + Q_{f1}) P_n k_c N_{\text{synt}}. \quad (8.12)$$

Мощность шумов, определяющая контраст фон/шум (обнаружение элемента в провале ФРП – «озеро» на рис. 8.2),

$$P_{n,\text{nl}} = (P_{f+n} D_U - P_f M_S^2) k_c N_{\text{synt}}. \quad (8.13)$$

Здесь  $M_S$  – средняя крутизна, вычисляемая взятием интеграла по частям,

$$M_S = M_1 \left\{ \frac{dF(U)}{dU} \right\} = \frac{1}{2\sigma_{f+n}} \int_0^{\infty} F(\sigma_{f+n} r) r^2 e^{-r^2/2} dr; \quad (8.14)$$

$$D_U = \frac{1}{2\sigma_{f+n}^2} \int_0^{\infty} F(\sigma_{f+n} r)^2 r e^{-r^2/2} dr \quad (8.15)$$

– дисперсия (мощность) суммарного процесса на выходе.

Окончательно получаем для отношения сигнал/фон+шум на выходе РСА

$$Q_{s/f+n,\text{nl}} = \frac{P_{s,\text{nl}}}{P_{f,\text{nl}} + P_{n,\text{nl}}} = Q_{s/f+n} \frac{M_S^2}{D_U}, \quad (8.16)$$

динамический диапазон по фону

$$D_{f,\text{nl}} = \frac{P_{f,\text{nl}} + P_{n,\text{nl}}}{P_{n,\text{nl}}} = \frac{1}{1 - \frac{M_S^2}{D_U (1 + 1/Q_{f1})}}. \quad (8.17)$$

Воздействие нелинейности в радиотракте сводится к тому, что изменяется средний уровень передаваемого сигнала (пропорционально средней крутизне  $M_S$ ) и появляется дополнительный широкополосный шум, вызванный нелинейностью (их сумма с шумом приемника пропорциональна  $D_U$ ). Таким образом, можно сделать вывод, что энергетические соотношения (контрасты) между целями (а также границами участков с разной УЭПР) в пределах мгновенной области облучения остаются такими же (с точностью до дополнительного шума), как и при отсутствии нелинейностей.



### Нелинейности в видеотракте РСА

В современных РСА основные источники нелинейности в видеотракте определяются разрядной сеткой АЦП и разрядностью вычислений при синтезе РЛИ. Необходимо рассматривать два явления – шумы квантования и шумы ограничения. Их влияние зависит от выбора единицы младшего разряда (ЕМР) АЦП по отношению к СКО входного процесса  $\sigma$  и числа разрядов АЦП  $N_{\text{ADP}}$ , определяющих число уровней квантования  $n_{\text{ADP}}$ , максимальный  $U_{\text{max}}$  и минимальный  $U_{\text{min}}$  уровни передаваемого сигнала.

Рассмотрим амплитудную характеристику АЦП  $U_2(U_1)$  – зависимость выходного напряжения  $U_2$  от входного  $U_1$ , как это показано на рис. 8.6 а. Примем, что минимальное и максимальное значения определяются размахом разрядной сетки, а промежуточные значения – округленным целым входного сигнала  $U_2 = \text{round}(U_1)$ . Число уровней квантования

$$n_{\text{ADP}} = 2^{N_{\text{ADP}}} . \quad (8.18)$$

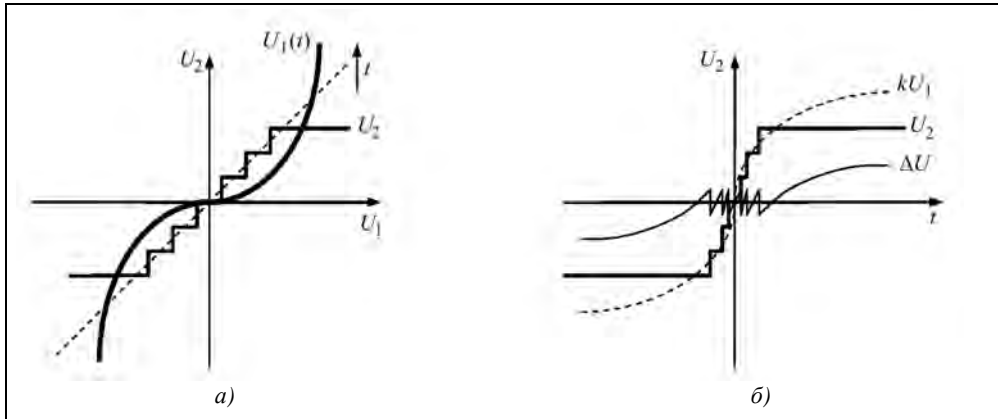


Рис. 8.6. Преобразование сигнала из аналоговой формы в дискретную:

а – амплитудная характеристика АЦП  $U_2(U_1)$ ; б – процессы на выходе АЦП:  $U_1(t)$  – входной временной процесс, совпадающий с выходным сигналом при идеальной линейной характеристике (пунктир);  $U_2(t)$  – выход АЦП;  $\Delta U(t)$  – ошибка дискретизации сигнала

Если уровни квантования сигнала АЦП расставлены равномерно, то шаг квантования (ЕМР) одинаковый и равен полному размаху  $2U_{\text{max}}$ , деленному на число уровней  $n_{\text{ADP}}$

$$\text{ЕМР} = 2U_{\text{max}} / n_{\text{ADP}} . \quad (8.19)$$

При проектировании АЦП желательно, чтобы при нулевом входном сигнале на выходе АЦП был бы равен нулю, и обеспечивалась симметрия выходного сигнала (что критично при малой разрядности АЦП). Иначе в выходном процессе может появиться зависящая от уровня входного сигнала постоянная составляющая. Максимальное передаваемое значение будет равно

$$U_{\text{max}} = \text{ЕМР} n_{\text{ADP}} / 2 - 1 , \quad (8.20)$$

а минимальное

## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

$$U_{\min} = -\text{EMР} n_{\text{ADP}} / 2. \quad (8.21)$$

В случае применения бортового синтеза РЛИ с использованием малоразрядного АЦП рекомендуется для симметрирования сигнала на входе процессора синтеза ограничивать минимальное значение сигнала до уровня, равного по модулю максимальному значению

$$U_{\min} = -U_{\max} = -(\text{EMР} n_{\text{ADP}} / 2 - 1). \quad (8.22)$$

Тогда для 4- или 8-разрядных (включая знак) АЦП будем иметь соответственно

$$U_{\max} = -U_{\min} = 7$$

или

$$U_{\max} = -U_{\min} = 127. \quad (8.23)$$

Таким же образом учитывают разрядность вычислительных процессов при обработке. Аналогичные соотношения имеют место для сигнала после синтеза апертуры и детектирования (вычисления модуля).

Ошибка дискретизации, равную разнице между входным непрерывным процессом и его дискретным представлением на выходе АЦП, можно выразить двумя процессами: шумом квантования (средняя часть кривой  $\Delta U(t)$  на рис. 8.6, б) и ошибками ограничения [18].

Если входной сигнал плавно меняется в пределах раствора амплитудной характеристики АЦП, то ошибка квантования имеет пилообразный характер со средним значением, равным нулю и размахом  $\pm \text{EMР} / 2$ . При подаче на вход АЦП случайного процесса ошибка квантования будет также случайным процессом, который при  $\sigma \geq 1,5 \text{EMР}$  характеризуется равномерным законом распределения

$$p(u) = \begin{cases} 1/\text{EMР} & |u| < \text{EMР}/2 \\ 0 & u \leq -\text{EMР}/2 \text{ при } u \geq -\text{EMР}/2. \end{cases} \quad (8.24)$$

Мощность шумов квантования

$$P_{\text{quant}} = \int_{-\text{EMР}/2}^{\text{EMР}/2} \frac{u^2}{\text{EMР}} du = \frac{\text{EMР}^2}{12}. \quad (8.25)$$

Вычислить мощность шумов ограничения и оценить потери в отношении сигнал/шум можно, воспользовавшись соотношениями (8.10)–(8.13), с подстановкой в них средней крутизны и дисперсии, вычисленных для реальной амплитудной характеристики видеотракта с учетом плотности распределения нормального процесса. Они пригодны также для произвольной амплитудной характеристики видеотракта, в том числе и для АЦП с неравномерным шагом. Средняя крутизна вычисляется взятием интеграла по частям

$$M_S = M_1 \left\{ \frac{dF(u)}{du} \right\} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dF(u)}{du} e^{-u^2/2\sigma^2} du = \frac{1}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(u) u e^{-u^2/2\sigma^2} du, \quad (8.26)$$

где  $F(u)$  – амплитудная характеристика видеотракта.

Дисперсия выходного процесса определяется следующими соотношениями

$$D_U = M_2 \{F(u)\} - M_1 \{F(u)\}^2, \quad (8.27)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – первый и второй моменты амплитудной характеристики

$$M_1 \{F(u)\} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(u) e^{-u^2/2\sigma^2} du; \quad (8.28)$$

$$M_2 \{F(u)\} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(u)^2 e^{-u^2/2\sigma^2} du. \quad (8.29)$$

Полученные соотношения позволяют вычислить потери на нелинейность в радиолокационном тракте. Для случая наблюдения цели на фоне местности («трактор» на рис. 8.1) потери (в децибелах) вычисляются по следующей формуле:

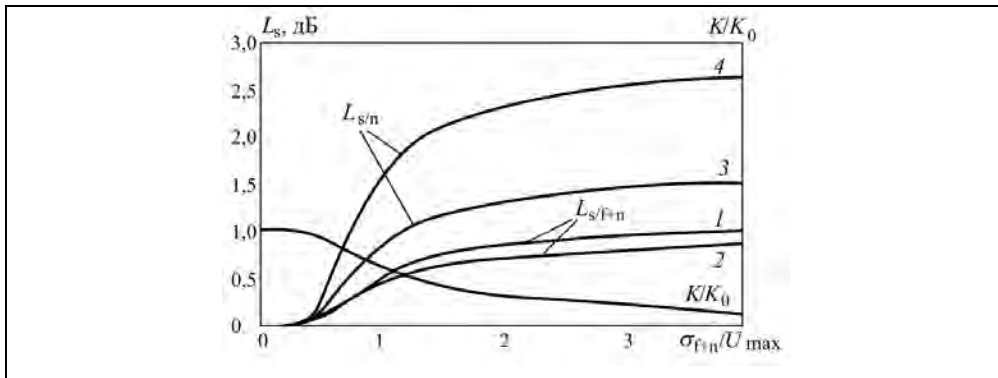
$$L_{s/f+n} = -10 \lg \left( M_S^2 / D_U \right). \quad (8.30)$$

Для цели в провале ФРП («лодка» на рис. 8.1)

$$L_{s/n} = 10 \lg \left[ 1 + \frac{P_f}{P_n} \left( 1 - \frac{M_S^2}{D_U} \right) \right]. \quad (8.31)$$

### Энергетические потери из-за ограничения сигналов

Формулы (8.30) и (8.31) справедливы и для расчета потерь на ограничение в радиотракте при подстановке в них значений  $M_S$  и  $D_U$ , вычисленных по формулам (8.14) и (8.15). Зависимости потерь при обнаружении цели на равномерном фоне (шумах)  $L_{s/f+n}$  и в провале ФРП  $L_{s/n}$  от отношения СКО суммарного входного процесса к уровню ограничения в радиотракте приведены на рис. 8.7.

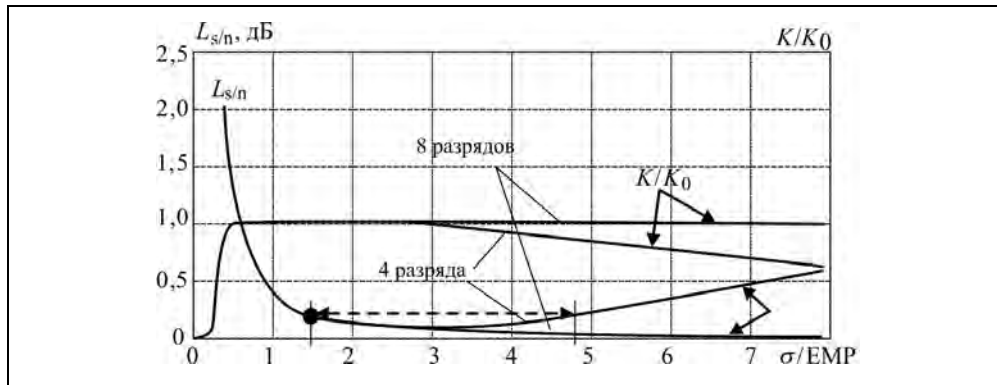


**Рис. 8.7.** Зависимости коэффициента передачи  $K/K_0$ , потерь  $L_{s/f+n}$  при обнаружении целей на равномерном фоне и потерь  $L_{s/n}$  для обнаружения цели в провале функции рельефа от отношения СКО суммарного входного процесса к уровню ограничения в видеотракте: 1 – идеальная характеристика; 2 – реальная амплитудная характеристика с «мягким» ограничением (см. рис. 8.4); 3, 4 – реальная амплитудная характеристика при отношении фон/шум 3 дБ (3) и 5 дБ (4)

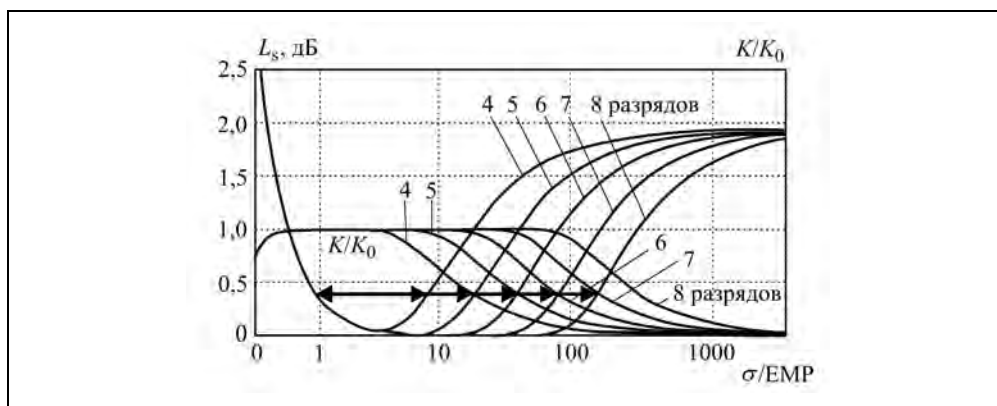
## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

Для оценки потерь, вызванных квантованием сигнала в видеотракте, на рис. 8.8 приведены зависимости  $K/K_0$  и потерь в отношении сигнал/фон+шум  $L_{s/n}$  при изменении уровня суммарного процесса на входе АЦП – отношения СКО суммарного процесса среднеквадратичного значения  $\sigma_{r+n}$  к единице младшего разряда АЦП. Из графиков следует, что при выборе уровня входного сигнала  $\sigma_{r+n} > 1,5 \cdot \text{ЕМР}$  потери не превышают 0,2 дБ, что и рекомендуется для согласования выхода приемника со входом АЦП. На рисунке пунктиром показаны границы динамического диапазона по фону. Он составляет для 4-разрядного АЦП  $\sim 10$  дБ (значения  $\sigma_{r+n}$  в диапазоне  $(1,5 \dots 4,8) \cdot \text{ЕМР}$ ). Потери отношения сигнал/шум в провале функции рельефа не превышают 0,2 дБ.

Аналогичные кривые для больших уровней входного сигнала и разной разрядности АЦП приведены на рис. 8.9. На нем стрелками отмечены границы реализуемого динамического диапазона по фону при заданных потерях  $L_{s/n}$ .



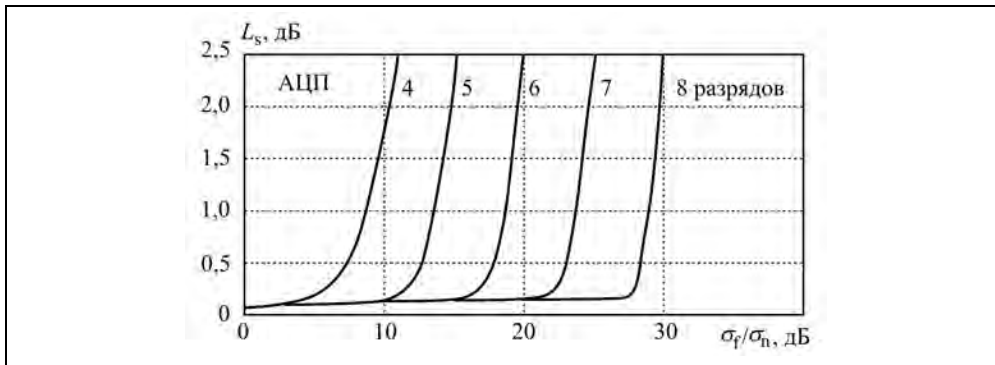
**Рис. 8.8.** Зависимости коэффициента передачи  $K/K_0$  и потерь  $L_{s/n}$  при обнаружении цели в провале функции рельефа от отношения СКО суммарного входного процесса к ЕМР АЦП (пунктиром отмечены границы динамического диапазона по фону для 4-разрядного АЦП)



**Рис. 8.9.** Зависимости коэффициента передачи  $K/K_0$  и потерь  $L_s$  на квантование и ограничение от уровня сигнала на входе АЦП

В локальных областях в пределах мгновенной площадки облучения передаются естественные отношения контрастов для участков фона («лес», «луг») и целей с поправкой на шумы приемника и дополнительные шумы, вызванные нелинейностями. Ухудшение условий обнаружения таких ярких участков и целей на равномерном фоне не слишком велико (те же 1,8 дБ). Другое дело – обнаружение слабого фона («озеро») и целей («лодка») в окружении интенсивного фона. Там появление помех с уровнем 51 % от окружающего фона может значительно превысить уровень собственного шума и привести к падению контрастов суша/вода в несколько раз.

На рис. 8.10 приведены зависимости энергетических потерь при наблюдении цели («лодка») на шумах в провале ФРП («озеро») вблизи участков интенсивного фона от уровня входного сигнала. Уровень шумов приемника на входе АЦП  $\sigma_n = 1,5\text{EMР}$ . Из графиков следует, что при большом динамическом диапазоне значений УЭПР фона необходимо применение АЦП с большой разрядностью (8 разрядов).



**Рис. 8.10.** Зависимости потерь обнаружения цели на слабом фоне в окружении интенсивного фона от уровня входного сигнала при разной разрядности АЦП

### **Согласование амплитудных характеристик радиотракта и АЦП**

В заключение раздела о влиянии нелинейностей в тракте РСА на характеристики выходного сигнала отметим, что в нем рассмотрены механизмы взаимодействия и математический аппарат оценки энергетических характеристик сигналов на выходном РЛИ. В рассмотренной функции радиолокационного рельефа наиболее чувствительной является ситуация наблюдения «лодки» на «озере». В переводе терминов, применяемых для мониторинговых задач ДЗЗ, задачи видовой разведки соответствуют обнаружению объектов техники на лесных просеках, дорогах в ущельях, окруженных горными массивами, малых судов в фиордах и прибрежных горных районах.

Как было отмечено ранее, в обоих устройствах – радиотракте и видеотракте возможно ограничение сигналов. Потери на ограничение в радиотракте меньше, чем в видеотракте, так как высшие гармоники сигнала отфильтровываются в УПЧ и остаются только комбинационные частоты. Поэтому при согласовании характеристик радиотракта и видеотракта целесообразно выбирать максимальный уровень АЦП больше, чем размах выходного сигнала приемника. Наличие участка «мягко-

## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

го» ограничения в приемнике способствует сжатию динамического диапазона сигналов при приеме сигналов от сильно отражающих объектов. Это эквивалентно применению АЦП с переменным шагом и позволяет дополнительно расширить динамический диапазон сквозного тракта. Рекомендуется поддерживать уровень шума на входе АЦП  $\sigma_n \sim 1,5\text{EMР}$ , при больших уровнях входных сигналов, вызывающих ограничение, целесообразно применение цифрового АРУ в приемнике с включением в состав служебной информации устанавливаемых значений усиления (для радиометрической калибровки тракта). Пример корректировки ограничения сигналов в приемном тракте РСА приведен в разделе 11.6.

Ряд особенностей имеет выбор положения нулевого уровня сигнала в АЦП. Необходимо выполнение двух условий: чувствительности к сигналам малого уровня (шумов приемника при минимальном усилении УПЧ) и стабильности выходного значения для нулевого входного сигнала при изменениях окружающих условий (температуры, напряжения питания и др.). Первое условие гарантирует отсутствие «лысых мест» на РЛИ в местах перепада контраста местности, а второе обеспечивает контролеспособность сопряжения аналоговой и дискретной частей тракта РСА при наземной отработке и эксплуатации аппаратуры в полете.

Для оптимизации параметров сквозного тракта РСА с учетом нелинейностей амплитудных характеристик звеньев можно использовать рассмотренные выше формулы, а также методы моделирования преобразований сигналов в РСА, изложенные в гл. 10.

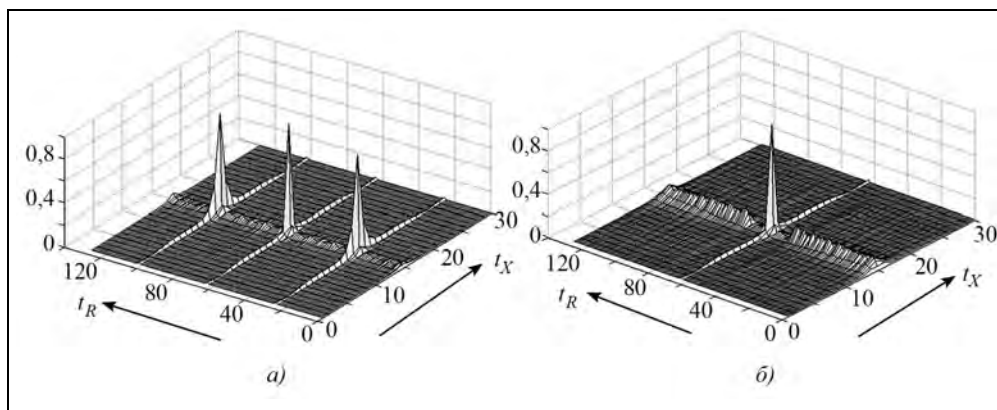
В современной практике проектирования космических РСА используют АЦП с достаточно большой разрядностью (6–8), однако для уменьшения потока передаваемых данных применяют адаптивные методы сжатия информации или уменьшение разрядности передаваемых данных до 2-, 3- и 4-х разрядов (PALSAR [316, 467]). Выбор варианта зависит от конкретной задачи радиолокационной съемки.

Ряд публикаций обосновывает возможность применения однобитового квантования (только знак сигнала [462]). Однако этот случай относится к кодированию выходных сигналов АФАР с цифровым формированием ДНА, где происходит суммирование сигналов от большого числа приемопередающих модулей. В результате формируются отсчеты квадратурных составляющих сигнала, записанные с большой разрядностью.

### 8.2. Подавление помех неоднозначности по дальности РСА

Как было отмечено в подразделе 3.6.3, неоднозначность по дальности может проявляться при проведении радиолокационной съемки у дальней границы полосы обзора с увеличением угла визирования, при котором ширина ДНА по углу места не обеспечивает отстройки от соседних ложных откликов неоднозначности по дальности. Возможно подавление ближайших ложных максимумов по дальности путем череспериодного изменения направления ЛЧМ зондирующих импульсов. Эта операция приводит к расширению ложных лепестков отклика по дальности до удвоенной величины длительности импульса (в  $2k_c$  раз) и уменьшению амплитуды при-

мерно в  $\sqrt{2k_c}$  раз при сохранении объема ложных лепестков, что является свойством функции неопределенности. Изменение формы импульсного отклика РСА показано на рис. 8.11.

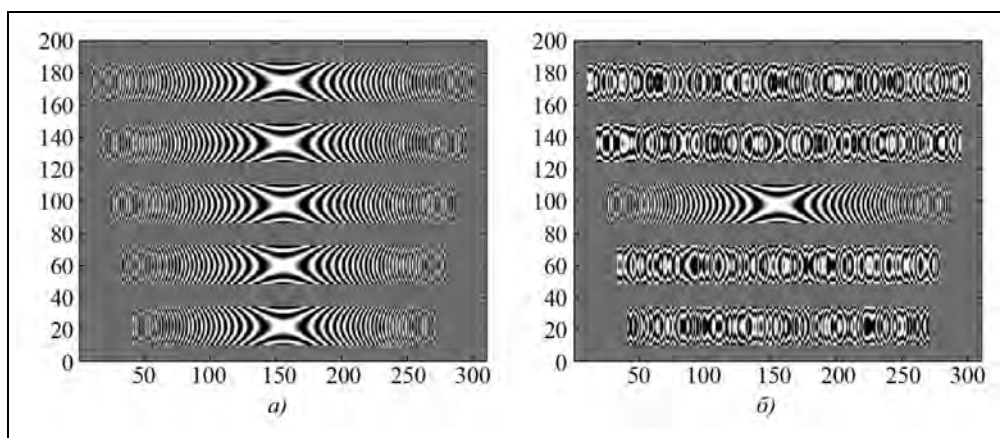


**Рис. 8.11.** Уменьшение амплитуды ложных максимумов отклика на РЛИ путем череспериодного изменения направления ЛЧМ зондирующих импульсов: *а* – исходная форма отклика; *б* – чередование направления ЛЧМ

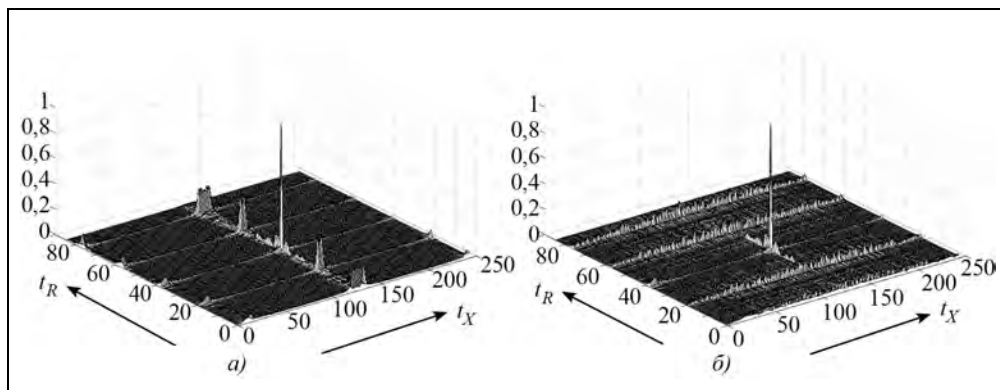
Рассмотренный метод снижения помех неоднозначности по дальности применим для режимов РСА, предназначенных для обнаружения компактных объектов на слабо отражающей поверхности, например, контроля надводной обстановки, обнаружения айсбергов. Для задач наблюдения протяженных поверхностей, например, суши, этот метод неэффективен, так как на РЛИ отношение сигнала к помехе от смещенных на рекуррентную дальность участков будет близко к единице.

Возможен метод снижения помех неоднозначности по дальности путем псевдослучайной череспериодной модуляции (рандомизации) зондирующего сигнала, например, введения фазовой манипуляции на  $[0, \pi]$  или фазово-временной модуляции по случайному закону с восстановлением когерентности принимаемого сигнала для каждой из временных зон рекуррентной дальности, попадающих в ДНА по углу места. Этот метод, не уменьшая мощности помехи, позволяет раскоррелировать ложные изображения, сводя помеху к простому увеличению шума, со снижением спектральных составляющих в рабочей области. Для подавления остаточного раскоррелированного шума неоднозначности можно применить некогерентное накопление РЛИ с увеличением размеров элемента разрешения. Использование известных процедур фильтрации спекл-шума, не подавляющих точечные цели (например, алгоритм  $\sigma$ -фильтрации), может привести к получению РЛИ, пригодного для дешифрирования при решении определенных задач, например, ледовой разведки. Вид радиолограммы и импульсного отклика при использовании рандомизации сигналов приведен на рис. 8.12 и 8.13. Следует иметь в виду, что обычно ложные отклики по дальности расфокусированы по азимуту и имеют меньшую амплитуду, чем главный максимум, но большую длительность.

**Глава 8. Повышение информативности космических РСА**



**Рис. 8.12.** Вид радиогограмм сигналов от точечной цели, принятых с разных рекуррентных зон дальности:  
*a* – без рандомизации; *б* – с применением случайной череспериодной манипуляции фазы  $0, \pi$  и восстановлением в центральной зоне

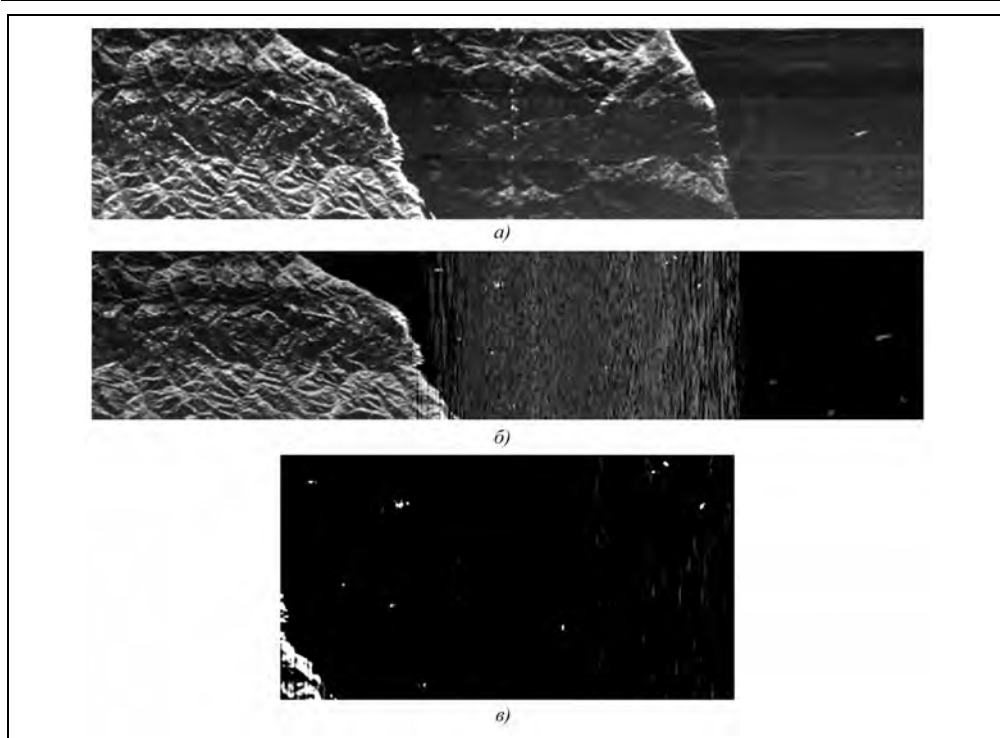


**Рис. 8.13.** Вид импульсного отклика РСА при использовании рандомизированного зондирующего сигнала:  
*a* – без рандомизации; *б* – с применением случайной череспериодной манипуляции фазы  $0, \pi$

На рис. 8.14 дано сравнение РЛИ с неоднозначностью по дальности, приведенного в подразделе 3.6.3 (рис. 3.26), с применением рандомизированного зондирующего сигнала. Область ложного изображения однозначно опознается как ложная, а после пороговой обработки обнаруживаются суда в акватории, которые на исходном снимке были замаскированы помехой неоднозначности.

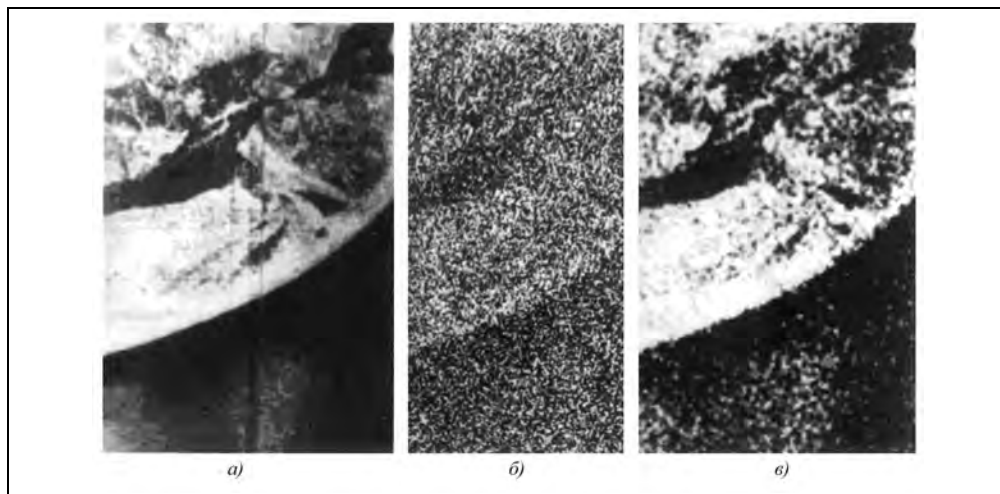
На рис. 8.15 приведена модель РЛИ для случая расширением полосы съемки в четыре раза по отношению к стандартному режиму и применению рандомизированного зондирующего сигнала. Показана одна из парциальных рекуррентных зон. Чтобы восстановить изображения в других зонах кодовую последовательность манипуляции фазы принятого сигнала смещают на число периодов повторения, соответствующее временной задержке до данной зоны съемки.





**Рис. 8.14.** Применение рандомизации зондирующего сигнала для подавления неоднозначности по дальности:

*a* – РЛИ, полученное в обычном режиме; *б* – вид РЛИ при использовании случайной фазовой манипуляции сигнала; *в* – область, пораженная помехой, после пороговой обработки (увеличено по горизонтали)



**Рис. 8.15.** Моделирование применения рандомизации сигнала для расширения полосы съемки: *a* – исходное РЛИ (Ладожское озеро, РСА «Меч-К»); *б* – модель РЛИ с четырехкратным наложением рекуррентных зон и восстановлением в одной зоне; *в* – результат сглаживания восстановленного РЛИ

При проектировании современных РСА применяются цифровые формирователи опорных частот и сигналов. Это позволяет предусмотреть в каталоге сигналов полный набор вариантов для подавления неоднозначности [243\*, 244\*, 440\*].

В проекте двухрежимного РСА [298] для преодоления неоднозначностей сигналов предложено применить сложный зондирующий сигнал, представляющий собой пачку ЛЧМ-радиоимпульсов с полосой 1...2 МГц, смещенных по несущей частоте, следующих с высокой частотой повторения, которая обеспечивает однозначность сигналов по азимуту. Период следования пачек выбран из условия однозначности сигналов по дальности. Суммарная полоса сигнала составляет около 100 МГц. Принятые антенной и усиленные малошумящим СВЧ-усилителем сигналы поступают на многоканальный блок смесителей, где они с помощью смещенных по частоте гетеродинов преобразуются в набор сигналов с одной промежуточной частотой для их усиления в многоканальном приемном устройстве. РСА с высотой орбиты КА 650...750 км должен обеспечивать в широкозахватном режиме полосу съемки 700...800 км с разрешением 100 м. Предусмотрена специальная обработка многоканального сигнала с формированием «усредненного» разрешения по азимуту. В детальном режиме луч антенны сужают по углу места до полосы съемки 10...15 км и обеспечивают разрешение 3...5 м. Число приемных каналов 5...10.

### 8.3. Подавление помех неоднозначности по азимуту в РСА высокого разрешения

Вопросам снижения помех от азимутальной (доплеровской) неоднозначности посвящено много публикаций (см., например, [106–108, 110, 111, 170, 171, 367, 368, 412, 417]). Основные выводы, сделанные в этих работах, состоят в том, что могут рассматриваться методы подавления помех при наблюдении мощных компактных целей типа «постоянных отражателей» (permanent scatterers), в частности, судов на морской поверхности. К рассмотренным методам относится адаптивная фильтрация с применением концепции «идеального» фильтра и компенсацией артефактов, место которых рассчитывается по обнаруженным в главном лепестке мощным отметкам от компактных целей. Другая возможность снижения уровня ложных лепестков неоднозначности по азимуту связана с улучшением разрешения по дальности в детальном режиме съемки, что требует расширения полосы зондирующего сигнала. Это сопровождается двумя явлениями, вызывающими падение уровня боковых лепестков при их расширении по азимуту и дальности [109, 113]:

1) частотная зависимость углов неоднозначности синтезированной антенной решетки от длины волны несущего колебания, приводящая к относительному расширению доплеровского лепестка по азимуту;

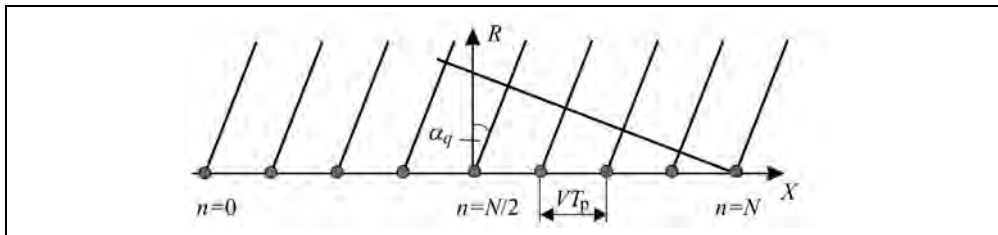
2) проявление миграции дальности, вызывающее расширение лепестков азимутальной (доплеровской) неоднозначности по наклонной дальности.

Рассмотрим эти явления. На рис. 8.16 показана синфазная синтезированная антенная решетка из  $N+1$  элементов, сформированная из радиоголограммы точечной цели после компенсации набега фазы [109]. Шаг решетки равен  $VT_p$ . Диаграм-

ма направленности такой решётки имеет побочные максимумы (лепестки), угловое положение которых определяется условием

$$\sin \alpha_q = \frac{q\lambda}{2VT_p} = \frac{qc}{2VT_p f_0}, \quad (8.32)$$

где  $\lambda$  – средняя рабочая длина волны излучаемого сигнала;  $c$  – скорость света;  $f_0$  – несущая частота сигнала;  $q=\pm 1, 2, \dots$  – порядок побочного дифракционного лепестка.



**Рис. 8.16.** Вид синфазной синтезированной антенной решётки.  
Образование лепестков неоднозначности

Ширина главного лепестка ( $q=0$ ) при боковом обзоре определяется известной формулой  $\delta\alpha_0 \cong \lambda/2L_a$ , где  $L_a$  – длина синтезированной антенны, ограниченная шириной луча антенны радиолокатора по азимуту. Ширина боковых лепестков для узкополосных РСА ( $\Delta F/f_0 \leq 1/2qN$ ) близка к ширине главного лепестка. Расширение полосы зондирующего сигнала, например, посредством применения ЛЧМ, приводит к отклонениям направлений ложных азимутальных лепестков в течение импульса относительно направления при средней частоте  $f_0$ . В результате ложный лепесток расширяется, а амплитуда его падает.

Для широкополосного сигнала, реализующего высокое разрешение по наклонной дальности  $\rho_R = c/2\Delta F$ , ширина лепестка неоднозначности по азимутальной координате определится суммарным эффектом (суммирование в квадратурах) от исходной ширины для узкополосного РСА и расширением от широкополосного сигнала

$$\delta X_q \cong \frac{R_0 \lambda_0}{2L_a} \sqrt{1 + \left( qN \frac{\Delta F}{f_0} \right)^2}, \quad (8.33)$$

где  $R_0$  – наклонная дальность цели;  $N$  – число импульсов в апертуре.

В соответствующее число раз, определяемое квадратным корнем в формуле (8.33), уменьшается амплитуда лепестка неоднозначности.

Число суммируемых импульсов  $N$  в апертуре космических РСА измеряется тысячами, что обеспечивает снижение уровня лепестка неоднозначности на 10...20 дБ даже при относительно узкополосном зондирующем сигнале (~20...40 МГц в выделенных для космической радиолокации диапазонах волн). Число когерентно накапливаемых импульсов в синтезированной апертуре при работе с азимутальной неоднозначностью можно выразить через число ложных максимумов  $N_q$  в ДНА

$$N \cong \frac{L_a}{VT_p} = \frac{R\lambda}{2D_{\text{xant}}^2 (N_q / 2 + 1)}, \quad (8.34)$$

где  $D_{\text{xant}}$  – горизонтальный размер антенны радиолокатора;  $N_q \cong 2(2VT_p/D_{\text{xant}} - 1)$  – число лепестков неоднозначности в азимутальной ДНА.

Эффект влияния миграции дальности поясняет рис. 8.17 [368]. Каждый отсчет радиоголограммы представляет собой отраженный сигнал от полоски местности, размер которой по наклонной дальности определяется размером элемента разрешения  $\rho_R = c/(2\Delta F)$ , а протяженность вдоль линии пути – размером следа азимутальной ДНА радиолокатора. На рисунке показаны области приема отраженных сигналов на местности, содержащие точку фокусировки ( $C$ ) синтезируемой апертуры, для начального ( $A$ ) и конечного ( $B$ ) положений радиолокатора на участке траектории  $AB$ .

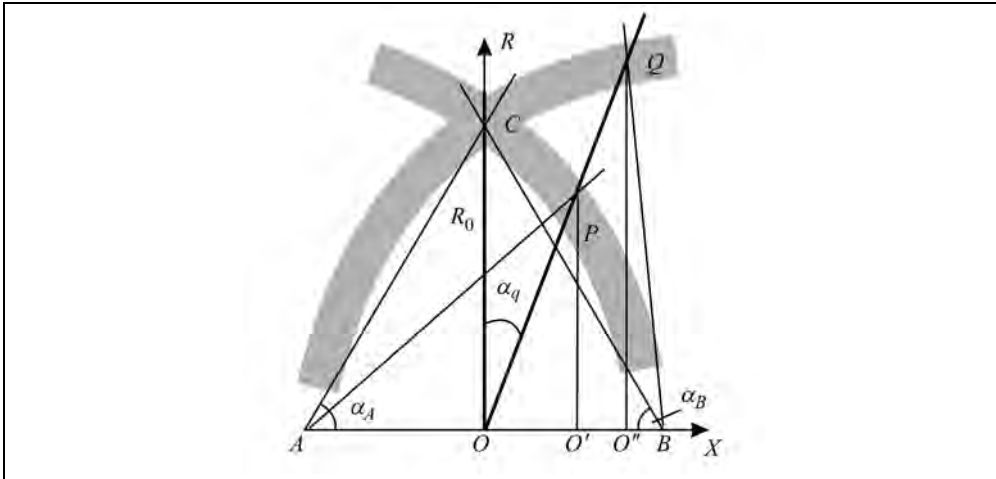


Рис. 8.17. Геометрия формирования импульсного отклика при наличии миграции дальности

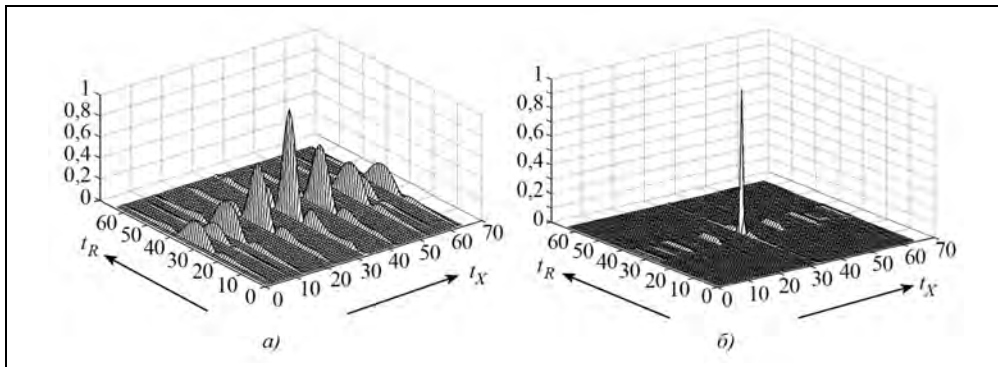
В течение времени пролета следа ДНА комплексные сигналы от точки  $C$  суммируются в фазе, скомпенсированной фильтром обработки, и дают отклик с амплитудой, равной  $N \times U_{C_{\text{max}}}$  (для простоты полагаем форму ДНА прямоугольной). Сигналы от остальных точек в дуговых секторах, смещенные по доплеровской частоте, подавляются при суммировании вдоль апертуры, кроме точек доплеровской неоднозначности. Точки неоднозначности суммируются в фазе вдоль направления  $AP$  (или  $BQ$ ), отклоненных на угол  $\alpha_q$  от направления на точку  $C$ , и сигналы от них будут фиксироваться в азимутальных положениях радиолокатора в точках  $O'$  ( $O''$ ) в элементах дальности, отличающихся от  $R_0$ ,

$$R' = R_A \sin(\alpha_A - \alpha_q); \quad R'' = R_B \sin(\alpha_B + \alpha_q), \quad (8.35)$$

где  $R_A = R_B \cong \sqrt{R_0^2 + (L_a / 2)^2}$  – расстояния от границ синтезированной апертуры  $L_a$  до точки  $C$  ( $AC$  и  $BC$ );  $\alpha_A = \alpha_B = \arcsin(2R_0/L_a)$  – углы наблюдения точки  $C$  из границ синтезированной апертуры. В результате образуется вытянутый по дальности отклик, длина которого определится разностью  $\delta R = R'' - R' \approx PQ$ . Соответственно уменьшается амплитуда ложного лепестка в  $K_q$  раз

$$K_q = \frac{PQ}{\rho_R} = \frac{R'' - R'}{\rho_R} = \frac{2R_A \sin \alpha_q \cos \alpha_A}{\rho_R} \quad (8.36)$$

Для РСА со средним разрешением по дальности  $\rho_R \geq PQ$  миграция дальности не влияет на форму и уровень лепестков неоднозначности. Импульсный отклик космического РСА среднего разрешения (10 м) и высокого разрешения (2 м) приведены на рис. 8.18. Частота повторения взята равной 300 Гц вместо обычных 1500 Гц (пятикратная азимутальная неоднозначность). Горизонтальный размер антенны равен  $D_{\text{ант}}=10$  м, шаг азимутальных отсчетов –  $VT_p=25$  м.



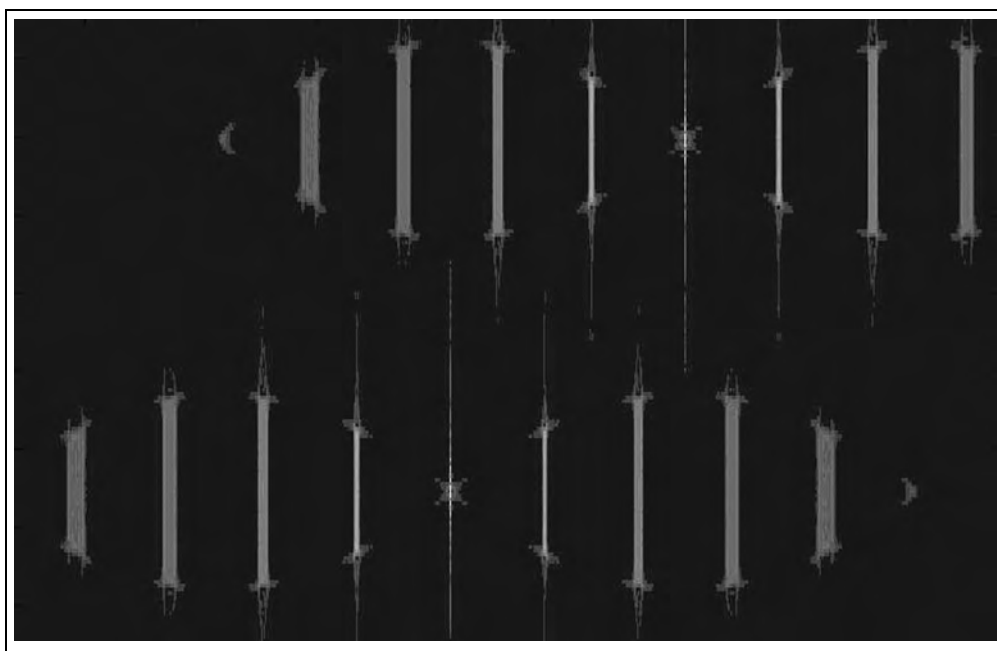
**Рис. 8.18.** Вид импульсного отклика РСА при азимутальной неоднозначности: *а* – РСА среднего разрешения  $\rho_R \sim 10$  м, помехи неоднозначности  $\leq -5$  дБ; *б* – РСА высокого разрешения  $\rho_R \sim 0,75$  м, помехи неоднозначности  $\leq -30$  дБ,  $D_{\text{ант}}=10$  м,  $F_p=300$  Гц,  $\lambda=10$  см,  $R_0=1000$  км, миграция дальности  $\Delta R=12$  м

В узкополосном РСА (см. рис. 8.18, *а*) лепестки азимутальной неоднозначности ниже главного лепестка (на 5 дБ и более). Это объясняется тем, что для прямоугольной ДНА выход оптимального фильтра имеет треугольную огибающую с основанием, равным удвоенной ширине азимутальной ДНА.

Для РСА высокого разрешения  $\rho_R \sim 0,75$  м (полоса сигнала  $\Delta F=200$  МГц) максимальный уровень боковых лепестков составляет минус 30 дБ (см. рис. 8.18, *б*). Для РСА с промежуточным разрешением по наклонной дальности  $\rho_R \sim 2$  м уровень помех неоднозначности ниже минус 20 дБ. Приведенные цифры свидетельствуют о целесообразности использования в РСА космического базирования этого метода подавления неоднозначности (наряду с другими) для расширения полосы обзора в области больших углов падения и повышения оперативности наблюдения, хотя бы в экспериментальных режимах мониторинга чрезвычайных ситуаций.

## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

На рис. 8.19 показаны артефакты на РЛИ, вызванные азимутальной неоднозначностью. Разрешение РЛИ по наклонной дальности составляет  $\rho_R \sim 1$  м. Радиоголограмма по азимуту по сравнению с обычным маршрутным режимом съемки оказывается прореженной в  $N_q$  раз. Поэтому для получения разрешающей способности РЛИ по азимуту, равной половине горизонтального размера антенны, необходимо при синтезе РЛИ применять интерполяцию сигнала на виртуальную частоту повторения, с тем, чтобы шаг отсчетов соответствовал теореме Котельникова для однозначной передачи спектра доплеровских частот. Методы такой интерполяции близки к применяемым для синтеза РЛИ в прожекторном режиме съемки или в режиме двойного приема.



**Рис. 8.19.** Вид артефактов на РЛИ двух целей, смещенных по азимуту (5 км) и дальности (50 м): полоса зондирующего сигнала  $\Delta F=150$  МГц (по горизонтали отложен азимут, по вертикали – наклонная дальность)

Кроме рассмотренных выше были предложены методы адаптивного подавления (редукции) помех доплеровской неоднозначности посредством фазовой компенсации фрагментов артефактов, реализуемой дифференциальной интерферометрической обработкой комплексных РЛИ [112, 367, 368]. В частности, в этих работах подтверждена эффективность указанных методов для случая наблюдения компактных целей. Применительно к наблюдению пространственно распределенных поверхностей выигрыш в снижении интегрального уровня неоднозначности не превышает  $\sim 3$  дБ. Важным преимуществом предложенных в этих работах методов является то, что повышение информативности РСА реализуется путем обработки получаемой

информации, не усложняют построения бортовой аппаратуры и могут использоваться в расширенных режимах работы космических РСА.

Для ряда задач расширение полосы съемки в РСА путем снижения помех неоднозначности по азимуту имеет преимущества по сравнению с рассмотренными в предыдущем разделе методами подавления неоднозначности по дальности. Это обусловлено тем, что при работе на больших углах падения с увеличенной полосой съемки выбор частоты повторения, гарантирующей азимутальную однозначность, приводит к появлению нескольких рекуррентных зон дальности. Принятый сигнал от любой из них создает помеху для всех остальных зон. В расширенной зоне захвата возникают «слепые» области в моменты излучения зондирующих сигналов с длительностью импульса супрессии приемника. Особые преимущества имеет режим с подавлением помех неоднозначности по азимуту в космических РСА контроля надводной обстановки, для которой основным объектом наблюдения является слабоотражающая морская поверхность с ограниченными участками прибрежной суши, примыкающей к морской поверхности, произвольно по азимуту и дальности с образованием артефактов в зоне облучения наблюдаемой поверхности узким азимутальным лучом.

#### **8.4. Методы расширенной обработки радиолокационных изображений**

Используемые в современной практике тематической обработки радиолокационных снимков программные пакеты предназначены для выполнения набора операций, включающих импорт-экспорт данных космических РСА для ДЗЗ и охватывающих всю номенклатуру работавших на орбите РСА, начиная с РСА SEASAT. Эта задача облегчена стандартизацией форматов получаемых данных, а также сопроводительной служебной информации (стандарты CEOS [460, 464, 502, 557, 558]).

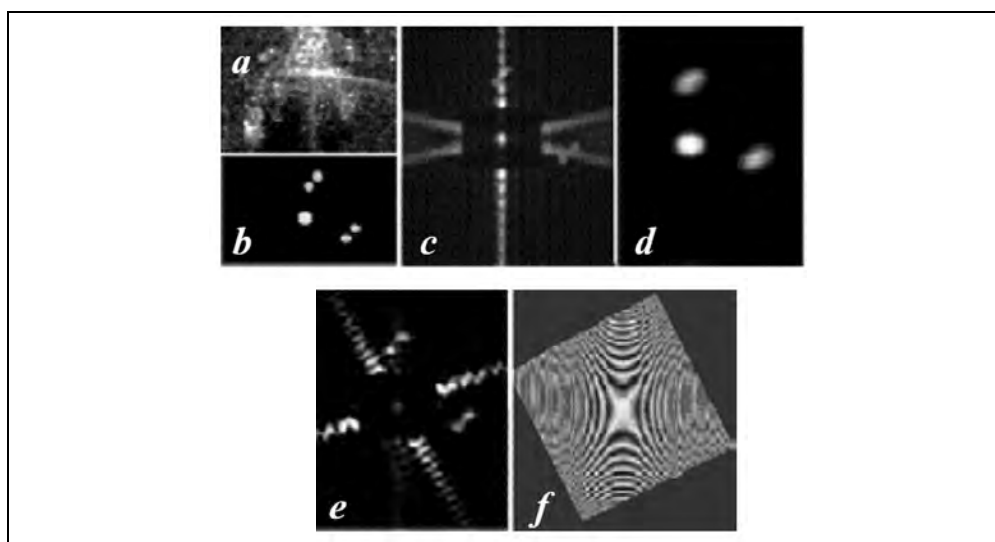
Общая тенденция состоит в том, что пользователь, как правило, получает готовые изображения в требуемых режимах съемки и параметрах (уровнях) обработки и решает свои прикладные задачи с применением перечисленных программных пакетов.

По мере освоения и внедрения космических информационных технологий в практическую деятельность региональных служб землепользования, экологического контроля и в сферу образования круг решаемых задач расширяется и возникает потребность преодолеть ограничения специализированных пакетов с привлечением универсальных программных средств обработки изображений (Photoshop, MATLAB и др.). Результаты развития методов тематической обработки радиолокационной информации регулярно публикуются в трудах конференций по ДЗЗ в России и за рубежом (ИКИ, ИПЭ, IGARSS, EUSAR и других). Особые перспективы имеет использование комплексных радиолокационных изображений. Целесообразно расширение функций, используемых в программных пакетах, предусматривая в них возможность расширенной обработки РЛИ, в том числе с применением среды MATLAB.

## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

К расширенным методам обработки радиолокационных изображений относится рассмотренный в гл. 6 метод локальной автофокусировки, использование моделирования преобразований сигналов РСА при тематическом дешифрировании РЛИ (см. гл. 9). В ряде случаев целью обработки является повышение достоверности извлекаемой из РЛИ информации – подтверждение, что наблюдаемые образования на снимке принадлежат реальным объектам, а не артефактам, вызванным искажающими воздействиями. Ниже приведен частный пример обработки КРЛИ для устранения артефактов функции отклика РСА.

Так, например, в целях устранения помех от «крестов» функции импульсного отклика можно применить двухмерную круговую аподизацию спектра изображения или же повернуть направление крестов в сторону от дешифрируемого объекта (рис. 8.20).



**Рис. 8.20.** Применение специальной обработки для улучшения дешифрирования РЛИ:

*a* – исходное изображение с артефактами; *b* – имитированная сцена с одной сильной и четырьмя слабыми (–30 дБ) целями; *c* – стандартная процедура обработки, слабые цели не обнаруживаются; *d* – 2-*D* гауссово взвешивание, кресты исчезают, слабые цели обнаруживаются, но не разрешаются; *e* – обработка с прямоугольным взвешивающим окном (*f*), повернутым относительно осей азимут-дальность, слабые цели обнаруживаются и разрешаются

### 8.5. Сжатие потока данных, передаваемых по радиолинии

В современных высокоинформативных РСА узким местом является линия передачи информации, пропускная способность которой ограничивает объем информации, которую можно передать на пункт приема и обработки информации. Обычно, поток данных, поступающих с аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в режимах с метровой и субметровой разрешающей способностью значительно превышает скорость передачи данных. Так, например, при периоде зондирования 250 мкс (частота повторения 4000 Гц), частоте квантования 300 МГц, 8-бито-



вом квантовании действительной и мнимой составляющих сигнала и скважности записи сигнала 40 % (полоса съемки 15...20 км) требуемый поток передачи информации составляет 1920 Мбит/с (мегабод). Типичная пропускная способность одного канала линии передачи данных составляет 256...512 Мбод. Время сброса информации с низкоорбитального (до 1000 км) спутника на один наземный пункт приема не превышает 8 мин за один сеанс связи при 1–2 сеансах в сутки. Для согласования потоков на борту КА устанавливают буферные запоминающие устройства, а также применяют кодирование выходной информации с преобразованием ее до  $2 \times 4$  бит на отсчет радиоголограммы, а в экспериментальных режимах снижают разрядность кодирования до двух или трех бит. Для увеличения времени передачи информации на наземные пункты используют спутники-ретрансляторы на геостационарной орбите.

В принципе снижение потока передаваемой информации может быть достигнуто применением синтеза РЛИ на борту КА с передачей на землю только амплитудного РЛИ. Однако при этом существенно снижается ценность получаемой информации с невозможностью использования ее для интерферометрической обработки, которая необходима в современных условиях и для идентификации земных покровов, и для выявления изменений в оперативной обстановке в районах наблюдения. Поэтому в структурной схеме РСА должно быть предусмотрено сжатие радиоголограммы, обеспечивающее снижение потока выходных данных.

Как показывает анализ, известные технологии JPEG, эффективно применяемые для сжатия «гладких» оптических изображений, имеющих спектр, плавно спадающий в области высоких частот, малопригодны для сжатия радиоголограмм с их близкой к прямоугольной огибающей спектра. Для сжатия радиоголограмм используют метод блочного квантования с плавающей точкой BFPQ (Block Float Point Quantization), а также алгоритмы блочного адаптивного квантования (BAQ – Block Adapted Quantization), модернизированный (fuzzy) FBAQ, блок-адаптивный векторный BAVQ и другие, позволяющие разделить радиоголограмму на участки (блоки), измерить и записать среднее значение коэффициента передачи по блоку в формате с плавающей точкой и записать информацию о сигнале с меньшей разрядностью [246, 255, 256, 262, 376, 437, 463, 476].

Обычно сжатие данных реализуют путем снижения количества уровней квантования цифрового сигнала по амплитуде, что позволяет кодировать данные меньшим количеством бит на отсчет. Применять сжатие ко всей радиоголограмме целиком нецелесообразно, так как это может привести к потере информативности снимка, например, если подстилающая поверхность в кадре является сильно неоднородной. Поэтому алгоритмы сжатия должны основываться на разбиении цифровой радиоголограммы на блоки, где диапазон амплитуд в пределах блока данных намного меньше, чем динамический диапазон всей первичной информации. При этом необходимо знать статистические параметры распределения сигналов.

Структурные схемы основных алгоритмов сжатия представлены на рис. 8.21. Выполняется разбиение данных на блоки для косинусной (действительной) и синусной (мнимой) составляющих, которые имеют гистограммы, близкие к распре-

## Глава 8. Повышение информативности космических РСА

делению Гаусса с нулевым математическим ожиданием. Для каждого из блоков вычисляют среднеквадратичное отклонение, значения блока данных кодируют 2-битовым квантователем. В алгоритме блока адаптивного квантования определяют степень отличия распределения в блоке данных от распределения Гаусса, оценивая среднеквадратичное отклонение для блока данных. Это позволяет правильно различать закодированную первичную информацию от возможно ошибочной первичной информации. В блок-адаптивном векторном преобразовании передается адрес вектора из «книги векторов», которому соответствует с минимальной ошибкой закодированные данные в блоке. Здесь качество выходной информации зависит от составляемой «книги векторов». В методе DCT-BAQ квантованию предшествует дискретно-косинусное преобразование ДКП (Digital Cosine Transformation), а в информации кодируются коэффициенты, полученные в процессе преобразования. Дискретно-косинусное преобразование задается формулой

$$F_k = \frac{1}{2} \left( f_0 + (-1)^k f_N \right) \sum_{j=1}^{N-1} f_j \cos \frac{\pi j k}{N}, \quad k \in \{0, 1, \dots, N\}. \quad (8.37)$$

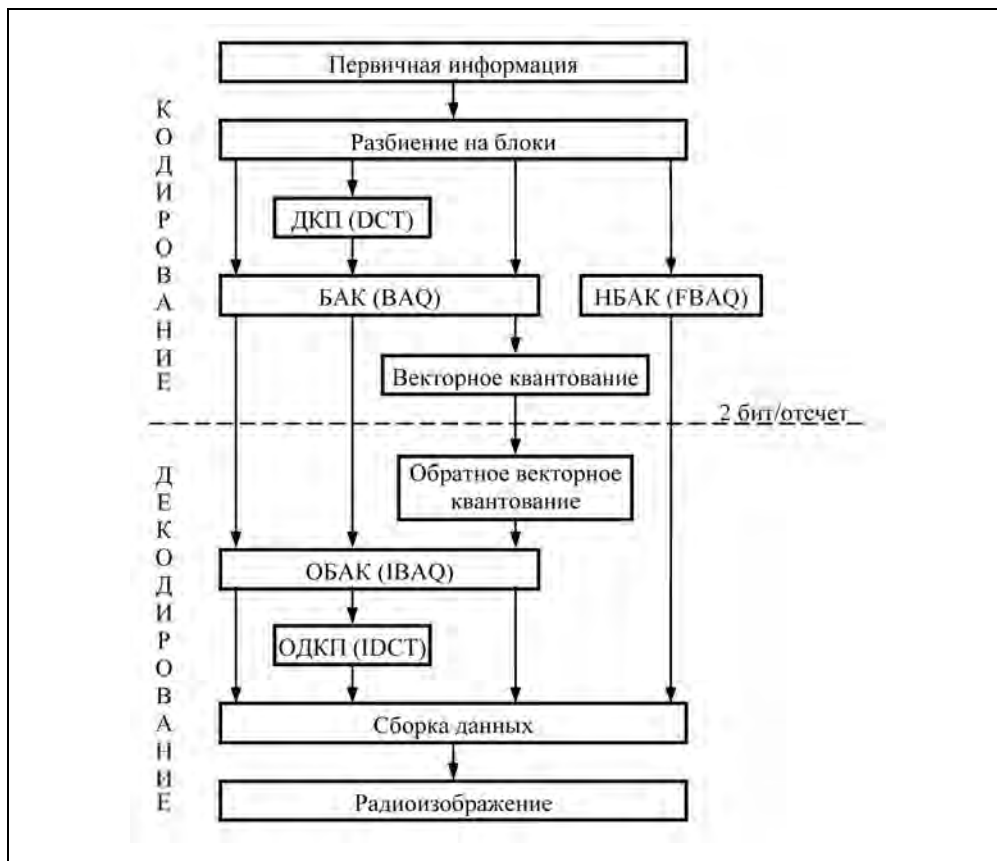


Рис. 8.21. Алгоритмы методов сжатия первичной информации РСА

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

Качество РЛИ, полученных с помощью PCA E-SAR и ERS-1 при передаче информации с дискретностью 6 и 5 бит/отсчет и сжатия ее до 2 бит/отсчет, оценивалось следующими параметрами: отношением сигнал/помеха (искажения), максимальным уровнем боковых лепестков (УБЛ) и их интегральным уровнем (ИУБЛ). Результаты применения описанных методов сжатия представлены в табл. 8.1 [476]. Наиболее эффективным алгоритмом сжатия является алгоритмом блочного адаптивного векторного квантования BAVQ, обеспечивающий наименьший уровень боковых лепестков отклика.

**Таблица 8.1. Параметры качества изображения в результате применения нескольких методов сжатия радиолограммы**

Метод сжатия	Отношение сигнал-помеха, дБ	Разрешение, азимут / дальность, м	УБЛ, дБ	ИУБЛ, дБ
Данные E-SAR:				
Без сжатия	—	4,6 / 2,9	25,45	13,96
BAQ	11,69	4,6 / 2,9	24,42	13,99
DCT-BAQ	2,09	4,6 / 2,9	18,34	9,65
BAVQ	11,94	4,6 / 2,9	24,69	15,15
FBAQ	8,00	4,6 / 2,9	23,63	15,19
Данные ERS-1:				
Без сжатия	—	27,7 / 20,2	23,45	13,09
BAQ	8,77	27,7 / 20,2	23,42	13,29
DCT-BAQ	5,17	27,7 / 19,9	18,40	9,81
BAVQ	9,56	27,7 / 20,3	23,02	13,39

---

## Глава 9

# СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

### 9.1. Цели, задачи и методы тематической обработки радиолокационной информации

В настоящее время задачу формирования радиолокационных изображений по материалам космической радиолокационной съемки (действительных, комплексных, поляриметрических, в разных диапазонах волн, с различным пространственным разрешением от долей метра до сотен метров) можно считать практически решенной.

Совершенствование аппаратуры космических РСА направлено на повышение оперативности радиолокационного наблюдения до долей часа, расширение частотных диапазонов вверх и вниз (до метровых волн с использованием видеоимпульсных РСА), миниатюризацию аппаратуры, увеличение пропускной способности средств доставки информации потребителю. Проводятся также разработка и совершенствование новых методов радиолокационного зондирования, например, многопозиционной радиолокации, подповерхностного зондирования, обнаружения опасных волновых явлений в океане, создания архивов и банков радиолокационных данных фоноцелевой обстановки. Совершенствование аппаратно-программных средств получения радиолокационных изображений (первичная обработка) ведется преимущественно в направлении повышения быстродействия вычислительных средств для сокращения временных затрат на получение радиолокационных снимков.

Целью вторичной, тематической обработки радиолокационной информации космических РСА является извлечение из материалов радиолокационной съемки содержательной информации об объекте съемки для ее практического использования конкретными потребителями [12, 61, 78, 165, 167, 211, 212, 242, 301, 484]. Современные технологии компьютерной обработки космических снимков предусматривают комплексное использование материалов радиолокационной, оптической и ИК-съемки, архивных данных, картографической и метеорологической информации. Процесс обработки включает процедуры автоматического сегментирования изображений, классификации основных типов объектов (дорожной сети, гидрографии, растительного покрова, инженерных сооружений), а также детализацию типа объекта (распознавание) до уровня, требуемого конкретными потребителями.

В процедурах распознавания РЛИ используют классические алгоритмы сравнения с эталонами по вектору информационных признаков в метрическом пространстве [238]. По мере развития методов дистанционного зондирования, усложнения аппаратуры, набора опыта дешифрирования космических снимков от разных датчиков изменяется состав информационных признаков, повышаются точности идентификации объектов и оценки их параметров. При этом остается актуальной проблема оп-

тимального выбора пространства признаков с учетом доступных для использования первичных данных: их типа, параметров, цены информационных продуктов, достигаемого экономического эффекта от получаемой конечной информации.

Ценовая политика зарубежных поставщиков радиолокационной информации заключается в том, что задается цена на базовый продукт в стандартных режимах съемки, одинаковая на маршрутное РЛИ (Path Image – SGF или SGX) и на КРЛИ (Single Look Complex – SLC), цена двух поляризаций (ГГ+ГВ или ВВ+ВГ) возрастает на ~5,6 %, а четырех поляризаций – на 50 %. Так, для PCA Radarsat-2 по состоянию на 2008 г. цена базового РЛИ с разрешением 3 м составляла 5400 долл. США, с разрешением 8 м – 3600 долл. США (одно наблюдение) и 4200 долл. США (несколько наблюдений), с разрешением 25 м – 3600 долл. США. Цена РЛИ (КРЛИ) с четырьмя поляризациями с разрешением 6 или 25 м составляла 5400 долл. США [564].

Цена архивных снимков ERS-1/2, ENVISAT/ASAR с разрешением 30 м составляет 400 евро, с разрешением 75 м (ENVISAT) – 75 евро. Цена заказных снимков ENVISAT/ASAR 600 евро при заказе за 15 сут, 900 евро – за 8 сут и 1600 евро – особо срочные (за 3 сут). Информация предоставляется на CD-дисках или по Интернету. При заказе больших пакетов с повторной съемкой, в том числе для интерферометрии предоставляются скидки [559]. Практикуется передача радиолокационной информации в региональные центры обработки в рамках договоров о совместной деятельности по отработке методов интерпретации РЛИ и извлечения научной информации о планете Земля [75, 147, 378 и др.].

Условием эффективной организации процесса тематической обработки радиолокационной информации является формирование банков эталонов, удовлетворяющих возрастающим требованиям по детализации типов объектов и надежности распознавания для военных и гражданских областей применения.

Особая ситуация касается мониторинга катастроф, наиболее связанных с опасностью экологических бедствий. Роль радиолокационного зондирования здесь особенно велика благодаря их всепогодности и измерительным свойствам. По мнению специалистов НИИКАМ в этих случаях должен реализовываться принцип «наилучших доступных технологий» с внедрением в системы гражданского применения технологий, имеющихся в военном секторе [29].

Совершенствование средств вторичной обработки радиолокационной информации направлено на развитие инструментальных технологий идентификации, оценки состояния и выявления изменений в объектах наблюдения, автоматизации процесса тематической обработки, включая автоматизацию составления высокоточных крупномасштабных топографических карт по данным радиолокационной съемки, создание каталогов и банков эталонной информации по земным покровам и объектам для их автоматической идентификации и классификации. Развитые компьютерные технологии, дополненные априорной информацией об оперативной обстановке и материалами от других датчиков, расширяют возможности методов визуального дешифрирования с выбором наиболее подходящих программно-алгоритмических средств и их модификации к конкретно решаемым задачам [29, 75, 120, 491]. Важным аспектом является стандартизация информационных продуктов, методик формирования банков данных и тематической обработки информации [89].

Разрабатываются технологии точного измерения геометрии инженерных сооружений, зданий, дорожного покрытия для прогноза аварийных ситуаций, обеспечения строительных работ, технологии выявления изменений в оперативной обстановке для сопровождения поисково-спасательных работ, количественные методы оценки объемов природных ресурсов (биомассы, водозапаса), объемов загрязнений в задачах экологического мониторинга и мониторинга катастроф, оценки послерубочной и пирогенной динамики лесных массивов и т.д.

Выходной продукт обработки, как правило, представляет собой картосхемы в векторной форме с соответствующими обозначениями и пояснениями. Для случая индикации движущихся целей выпускаемые материалы могут дополняться формулярами с измеренными параметрами движения. Для решения рутинных задач землепользования, мониторинга растительного покрова, геологического картирования, построения карт рельефа широко используются программные пакеты для обработки изображений (растровых данных) ENVI, ERDAS, SARscape, PHOTOMODE-Radar и др. Должно обеспечиваться выполнение следующих операций:

1) импорт-экспорт с поддержкой форматов данных, включая CEOS ERS, CEOS RADARSAT, CEOS SIR-C/X, ENVISAT/ASAR, PALSAR, TERRASAR-X и других, а также преобразование типов данных – амплитудных и комплексных изображений, включая наборы для интерферометрической обработки, радиолограммы (Raw Data);

2) преобразование растровых данных, включая операции с файлами данных (суммирование, вычитание, умножение и др.), вращение, отражение, интерполяцию, повторную дискретизацию изображений, изъятие и включение фрагментов для синтеза тестовых сцен;

3) геометрическая коррекция и привязка к местности снимков PCA (геокодирование, орторектификация, геореференцирование);

4) формирование цифровых моделей рельефа интерферометрическим методом;

5) выявление изменений в наблюдаемой обстановке методами некогерентной обработки и дифференциальной интерферометрии разновременных снимков;

6) улучшение качества радиолокационных изображений путем подавления спеклшума, апертурной коррекции, повышения резкости (edge detection), применения текстурного анализа;

7) статистический и спектральный анализ изображений с применением процедур БПФ, ОБПФ, амплитудного взвешивания и фазовой коррекции, БПФ-интерполяции;

8) визуализация входных данных и выходных 2D и 3D продуктов с оптимизацией масштабов и яркостной шкалы под условия дешифрирования;

9) документирование результатов обработки и параметров создаваемых продуктов.

Преимущества использования таких пакетов для обработки радиолокационных снимков состоят в том, что кроме простого отображения растровой информации в виде файлов GeoTIFF они обеспечивают координатную поддержку с привязкой к системе позиционирования GPS, а также (в ряде случаев) радиометрическую калибровку радиолокационных изображений по служебной информации, поставляемой в комплекте с изображениями.

Одна из продуктивных современных концепций извлечения полезной информации из материалов радиолокационного зондирования заключается в рассмотрении ансамбля радиолокационных датчиков как многопозиционной информационной системы ММО (Multiple Input Multiple Output) RADAR [403]. Эта концепция позволяет оптимизировать требования к элементам информационной системы и использовать все доступные методы анализа данных (некогерентные, когерентные интерферометрические, пространственно-временная обработка и т.д.).

Для интерпретации РЛИ природных площадных объектов с локальными неоднородностями, включая линейные элементы, используют нейросетевые подходы, которые позволяют проводить автоматическую сегментацию РЛИ с использованием пространственных взаимосвязей между его пикселями [237]. Сегментация и классификация РЛИ может выполняться, например, с использованием нейронных сетей Кохонена [345, 366], обладающих свойством формировать самоорганизующиеся карты Кохонена с автоматическим выделением статистически значимых свойств входных данных (самообучение без учителя). Идентификацию каждого пикселя РЛИ проводят по результатам анализа его ближайших окрестностей (на матрицах  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  и более). Важным аспектом является выбор информационных признаков в каждом пикселе – интенсивность, значения ее производных, различные преобразования (Фурье, вейвлеты). Эти признаки используют как входные значения нейронной сети, причем выход нейронной сети в данной процедуре определяют для каждого центрального пикселя. Технология применения такого подхода к информации от РСА Radarsar-1, ERS-2, Envisat для определения зон затопления после наводнений приведена в работе [237]. Этот метод был интегрирован в качестве сервиса в InterGrid-инфраструктуру, объединяющую ресурсы ряда организаций Украины, России, Китая и ЕКА и доступны для использования [237, 525].

В качестве мощного инструментария для идентификации наблюдаемых явлений используют моделирование радиолокационных изображений на основе анализа радиофизических процессов взаимодействия радиоволн с подстилающей поверхностью и объектами. Этот метод применяется для оценки топографии шельфа, ветровых воздействий на морскую поверхность, динамики ледовых образований и др. [92, 114, 162\*].

Данная глава не претендует на изложение всех аспектов тематической обработки материалов космической радиолокационной съемки. В ней дан краткий обзор областей применения космической радиолокационной съемки с анализом факторов, которые влияют на определение требований к разрабатываемой бортовой и наземной аппаратуре, выбор рабочих режимов, обеспечение качества выходных информационных продуктов.

Изложенный материал основан на опыте разработки радиолокационной аппаратуры землеобзора авиационного и космического базирования и проведенных экспериментальных исследований действующих образцов аппаратуры, накопленный коллективом ОАО «Концерн «Вега» в кооперации со специалистами ОАО «ВПК «НПО машиностроения», ИРЭ РАН, ИКИ РАН, ИО РАН и других организаций, проводящих исследования методов радиолокационного зондирования по материалам, полученным с помощью отечественной и зарубежной аппаратуры.

Применительно к разным направлениям использования радиолокационной информации рассмотрены:

- 1) конкретные задачи, решаемые в рассматриваемой области применения радиолокационной съемки;
- 2) уточнение информационных признаков и искажающих воздействий;
- 3) рекомендации по выбору параметров рабочих режимов РСА для решения конкретной задачи.

## **9.2. Формирование банков радиолокационных портретов объектов наблюдения**

### **9.2.1. Исходные материалы, получаемые самолетными и космическими РСА высокого разрешения**

Применение автоматических методов интерпретации РЛИ требует создания банка радиолокационных портретов объектов наблюдения [19]. Одно из важнейших требований, предъявляемых к ним, – простота адаптации к режимам обзора, условиям наблюдения и параметрам РЛИ, получаемым с помощью конкретных РСА. Возможно также применение методов математического моделирования с разделением объекта на отражающие элементы – facets и решение электродинамической задачи. Однако этот путь достаточно трудоемок и требует уточнений на основе экспериментальных данных.

Для формирования банков РЛ-портретов применительно к РСА космического базирования целесообразно использовать КРЛИ с высоким пространственным разрешением (метры и доли метров), получаемые с помощью самолетных РСА или космических РСА, в том числе с применением съемки в режимах «сверхразрешения» (см. раздел 4.2).

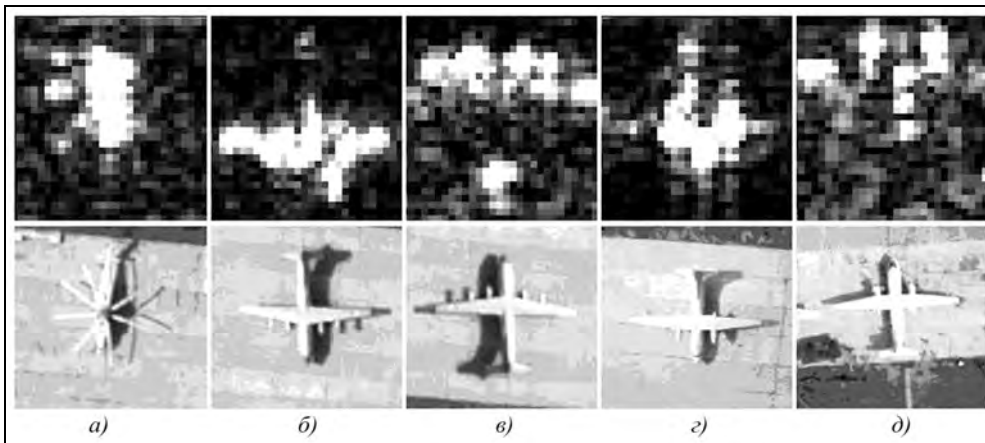
В статьях [50, 67] изложены методика и примеры получения данных для банка РЛ-портретов авиационной техники с помощью самолетного РСА «Компакт 100» 3-см диапазона волн, имеющего пространственное разрешение 1,5...3 м. В ходе исследований особое внимание уделялось сквозной калибровке тракта РСА. Типовые радиолокационные и оптические изображения самолетов в различных ракурсах приведены на рис. 9.1, а на рис. 9.2 даны значения ЭПР для отдельных самолетов и усредненные по типам значения ЭПР. Отмечено, что ЭПР самолета АН-20 при виде с носа  $\sigma = 1300...1400 \text{ м}^2$  превышает ЭПР ИЛ-76 с ракурсом  $45^\circ$  ( $\sigma \sim 500 \text{ м}^2$ ). К сожалению, углы падения в проведенных измерениях составляли  $81...85^\circ$ , что нетипично для космических РСА.

В статье [68] приведен метод формирования РЛ-портретов объектов техники, полученных по программе MSTAR (Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition). Рассмотрен метод подчеркивания в РЛИ контраста между сосредоточенными отражателями объекта и распределенной окружающей поверхностью. Метод основан на взвешенном суммировании степеней отсчетов амплитуды и производных амплитудного распределения. Вид исходного набора РЛИ (танк Т-72) для формирования эталонов с вариацией ракурсов через  $5^\circ$  приведен на рис. 9.3.

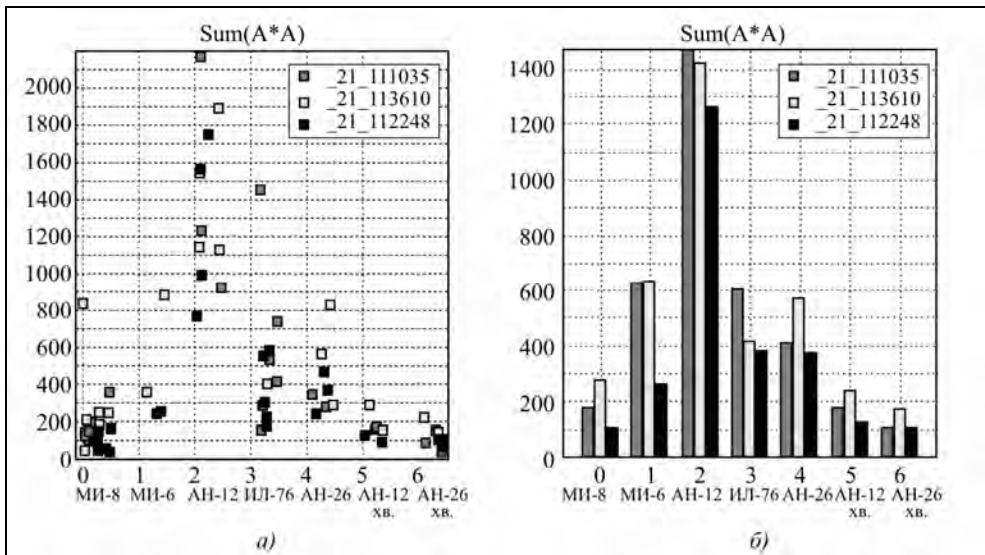


### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Исходные материалы для составления банка РЛ-портретов объектов и образцов подстилающей поверхности должны храниться в виде комплексных РЛИ, приведенных к единому масштабу по координатам вдоль и поперек линии пути. Должна быть обеспечена их радиометрическая калибровка. Требования использования КРЛИ высокого разрешения обусловлены необходимостью адаптации этих материалов для их применения в радиолокационной аппаратуре разных классов, с наличием средств автоматического распознавания объектов наблюдения.



**Рис. 9.1.** Типовые РЛ-портреты (вверху) и оптические изображения (внизу) авиационной техники различных ракурсах:  
*a* – вертолет МИ-6; *б, в* – самолет ИЛ-76; *г, д* – самолет АН-26;  
 ракурсы съемки: *a, б, г* – вид с носа; *в, д* – с хвоста (самолетный РСА «Компакт 100» [50])



**Рис. 9.2.** Значения ЭПР для отдельных самолетов (*a*) и усредненные по типам (*б*) [50]

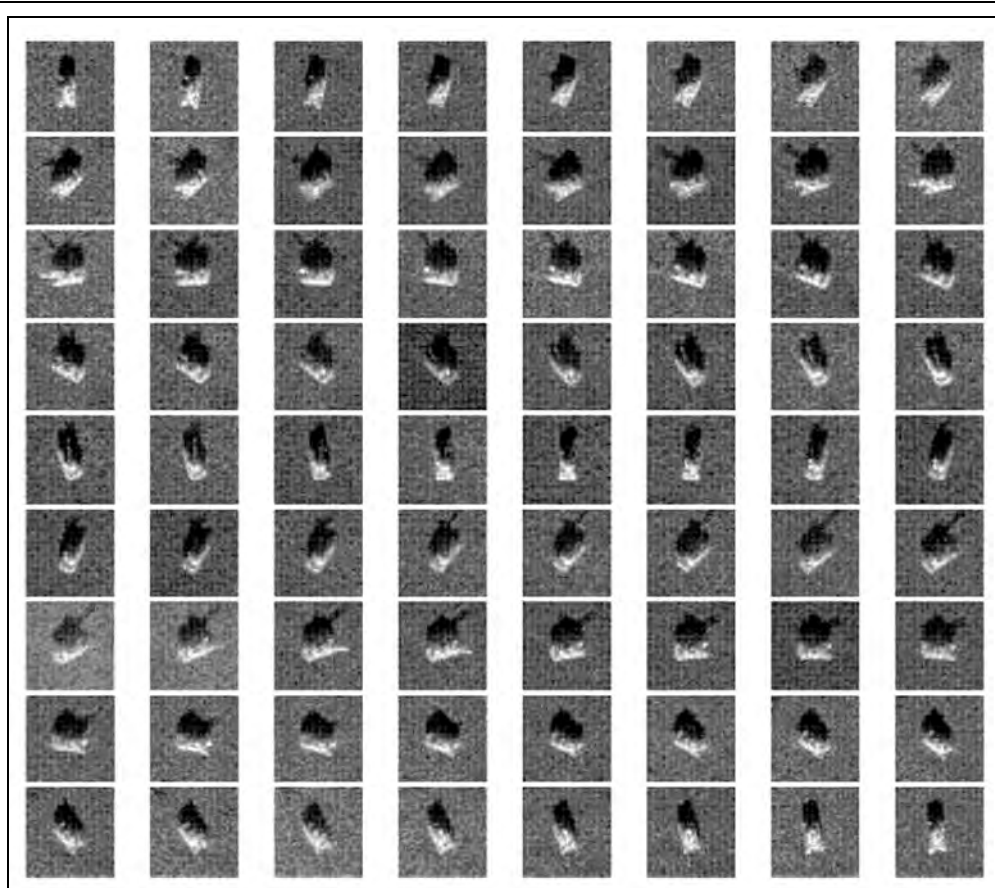


Рис. 9.3. Набор РЛИ танка Т-72 с изменением ракурса  $0 \dots 360^\circ$  с шагом через  $5^\circ$  (исходное разрешение 0,3 м, угол падения  $73^\circ$  [68])

### 9.2.2. Получение точечных моделей объектов наблюдения

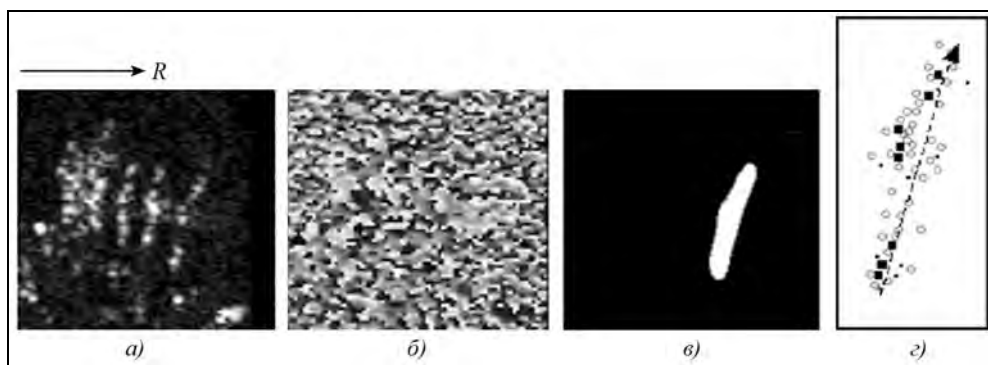
Для каталогизации комплексных радиолокационных портретов искусственных объектов, уменьшения объема данных, а также для проведения исследований по распознаванию классов объектов с анализом влияния различных факторов удобно использовать точечные модели объектов. Использовать для этих целей оператор деконволюции неэффективно, так как приводит к резкому возрастанию шумов.

Предложенная процедура «скелетизации» радиолокационных изображений исходит из предположения, что сигнал, отраженный от искусственных объектов, в основном формируется яркими компактными отражателями и набором случайных отражателей с малым общим вкладом по сравнению с вкладом ведущего отражателя. Типичным объектом, соответствующим этой модели рассеяния радиоволн, является башня–надстройка корабля с гладкой криволинейной основной отражающей поверхностью. Закон распределения амплитуды отраженного сигнала приближается к распределению Райса с основной когерентной составляющей.

Процедура «скелетизации» не является строго корректной. В частности, она не может различить отражающие точки объекта, расположенные на разной высоте. Однако ее применение облегчает моделирование изменчивости радиолокационных портретов объектов при изменениях ракурса наблюдения и отработку методов классификации объектов по их изображениям. Ценными свойствами рассмотренной процедуры является линейная передача амплитуды сигнала исходного РЛИ в выходной набор точечного РЛ-портрета с простотой нормировки суммарной ЭПР, а также возможность перехода от точечного представления РЛ-портрета к модели ожидаемого РЛИ для заданной разрешающей способности конкретного РСА.

Для задачи наблюдения надводных кораблей предложенный метод позволяет учитывать влияние качки, вызванной морским волнением. При исследовании этой важной проблемы использовались данные дистанционного зондирования морской поверхности в  $S$ -диапазоне волн, полученные с помощью РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1» в контролируемых условиях морского волнения [63\*].

Рассмотрим процедуру получения исходных данных для моделирования в виде точечных моделей объектов на примере изображений кораблей в бухте. В качестве исходных данных используем фрагмент  $S(X,R)$  комплексного изображения (Single Complex) в координатах азимут-наклонная дальность, которое предварительно преобразовано в 16-битовые форматы амплитуды A16.tif и фазы F16.tif, а также представлено в 8-битовом формате A8.bmp (или A8.tif). Вид исходных A16/F16-файлов (стоянка кораблей) показан на рис. 9.4, *а* и *б*. Яркость АРЛИ (файл A16.tif) увеличена в 10 раз. АРЛИ в формате A8.bmp (или A8.tif) используют для изготовления маски, выделяющей конкретный объект на групповом РЛИ. Эту процедуру выполняют путем ретуши РЛИ с использованием программ Paint или Photoshop.



**Рис. 9.4.** Последовательность выполнения процедуры скелетизации:

*а* – исходное АРЛИ в формате A16, яркость увеличена в 10 раз; *б* – исходное фазовое изображение (ФРЛИ); *в* – маска для выделения объекта на 8-битовом АРЛИ; *г* – точечная модель корабля (крайний справа); черные квадраты соответствуют уровням минус 6 дБ от максимума, окружности – минус 12 дБ, точки – минус 18 дБ (пунктирной линией со стрелкой показана продольная ось корабля)

Процедуры скелетизации выполняют в следующем порядке:

1) интерполируют A16, F16 и A8-изображения 4 раза, используя БПФ с раздвижкой спектра;

2) находят на интерполированном А8-изображении нужный объект и, используя Photoshop или Paint, делают маску  $Mask(X,R)$  для его выделения (правый корабль – БПК на рис. 9.4,а);

3) с использованием методики, изложенной в подразделе 11.1.3, получают усредненную, нормированную к единице, двумерную функцию импульсного отклика  $h(X_h, R_h)$ . Задают размер прямоугольного окна, за пределами которого обнуляют функцию отклика (примерно на уровне минус 20 дБ относительно максимума). По размерам окна обнуляют также граничные пиксели используемого фрагмента изображения.

На этом предварительные операции заканчивают и приступают к выполнению собственно процедуры получения точечной модели объекта:

1) выполняют поиск глобального максимума на изображении  $S_i(X_{max}, R_{max})$  и записывают в строке промежуточной матрицы  $M_1$  значения амплитуды, фазы и номеров пикселя по азимуту  $X_{max}$  и дальности  $R_{max}$ ;

2) из исходного комплексного изображения вычитают значения опорной функции, умноженные на комплексный отсчет в максимуме. В результате из изображения будет изъята одна точечная цель

$$S_{i+1}(X, R) = \begin{cases} S_i(X, R) - h(X_h, R_h) A_{max} e^{j\phi_{xmax}} & \text{при } X \in X_{max} \pm D_h/2 \text{ и } y \in R_{max} \pm D_h/2, \\ S_i(X, R) & \text{при } X \notin R_{max} \pm D_h/2 \text{ или } y \notin R_{max} \pm D_h/2, \end{cases} \quad (9.1)$$

где  $X, R$  – координаты по снимку;  $X_{max}, R_{max}$  – координаты глобального максимума изображения  $S_i$ ;  $X_h, R_h$  – координаты по опорной функции;  $A_{max}, \phi_{max}$  – амплитуда и фаза в максимуме;  $D_h$  – размеры окна;

3) повторяют предыдущие операции выделения отметки с максимальной амплитудой до тех пор, пока амплитуда оставшихся отметок не достигнет уровня шумов или подстилающей поверхности;

4) по данным, записанным в  $M_1$ , формируют точечное амплитудное изображение  $P(X,R)$  для полного фрагмента;

5) умножают  $P(X,R)$  на маску, получая точечное изображение выделенного объекта

$$P_1(X, R) = P(X, R)Mask(X, R). \quad (9.2)$$

Полученная точечная модель корабля показана на рис. 9.4, з. Обозначения отметок: квадраты – уровень выше минус 6 дБ от максимума, окружности – выше минус 12 дБ, точки – уровень выше минус 18 дБ. Отношение мощности максимальной отметки к среднему уровню отражения от морской поверхности составляет 25 дБ. Исходная разрешающая способность снимков 8 м по азимуту и 9 м по наклонной дальности.

С учетом масштаба интерполированного снимка 1,2 м длина корабля составляет 140 м. По величине отклонения отметок по наклонной дальности от продольной оси корабля можно оценить высоту надстроек. Они составляют около 15 м.

### 9.3. Контроль надводной обстановки

#### 9.3.1. Общие требования к решению задачи контроля надводной обстановки

Для решения задач контроля надводной обстановки в течение многих лет использовались радиолокаторы бокового обзора (РБО) системы морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ) в составе космических аппаратов УС-А, УС-АМ. Бортовые радиолокационные комплексы «Чайка» обеспечивали автоматическое обнаружение кораблей и селекцию сигналов от суши (см. гл. 13 и публикации [88, 545]). Контроль состояния морской поверхности и ледовая разведка осуществлялось с помощью космических РБО типа «Космос-1500», «Ресурс-О» [197]. Низкое пространственное разрешение, которое может быть обеспечено космическими РБО (1,5...2 км), ограничивает возможности обнаружения малых судов и идентификацию ледового покрова.

В современных условиях общая задача обнаружения судов (ship detection) включает в себя:

1) обнаружение и определение координат кораблей (в акваториях и базах) и судов разных классов. Особой задачей является контроль зон рыболовства с выявлением нарушителей, а также обнаружение контрабандистов на судах малого тоннажа;

2) определение класса (типа) морской цели;

3) определение курса и скорости.

В [554] сформулированы требования к перспективной системе контроля надводной обстановки ЕКА, разрабатываемой по программе Sentinel-1: поляризметрический (ГГ+ГВ) РСА с полосой съемки от 100...200 до 300...600 км и обнаружением судов с размерами от 3 м (поисково-спасательные операции), 15...35 м (рыболовы), 8...50 м (контрабандисты, торговцы оружием, террористы).

#### 9.3.2. Обнаружение морских целей

В условиях, когда размеры разрешаемого элемента РСА меньше линейного размера обнаруживаемой морской цели, вероятность ее обнаружения, в конечном счете (с учетом параметров РСА) определяется отношением ее ЭПР  $\sigma_s$  к ЭПР, создаваемой суммарным процессом отражения от моря и шумов приемника на площадке, определяемой отметкой от цели. Отношение сигнал/фон+шум равно

$$Q_{s.f+n} = \frac{\sigma_s}{(\sigma_f^0 + \sigma_{ne}^0) \rho_x \rho_y N_s}, \quad (9.3)$$

где  $\rho_x$ ,  $\rho_y$  – разрешение РСА по азимуту и горизонтальной дальности;  $N_s$  – число элементов разрешения, приходящихся на площадь отметки от цели, представляющей собой проекцию отражающих точек (в 3D координатах) на плоскость визирования (наклонная дальность – азимут) с учетом угла падения и ракурса цели.

Имея в виду последующую задачу распознавания класса целей по значению ЭПР, ее размерам и радиолокационному портрету, необходимо, чтобы на длину цели приходилось, как правило, более чем один элемент разрешения, например, для катера длиной ~40 м – 1–2 элемента, для сухогруза, танкера, эсминца, фрегата длиной 90...130 м

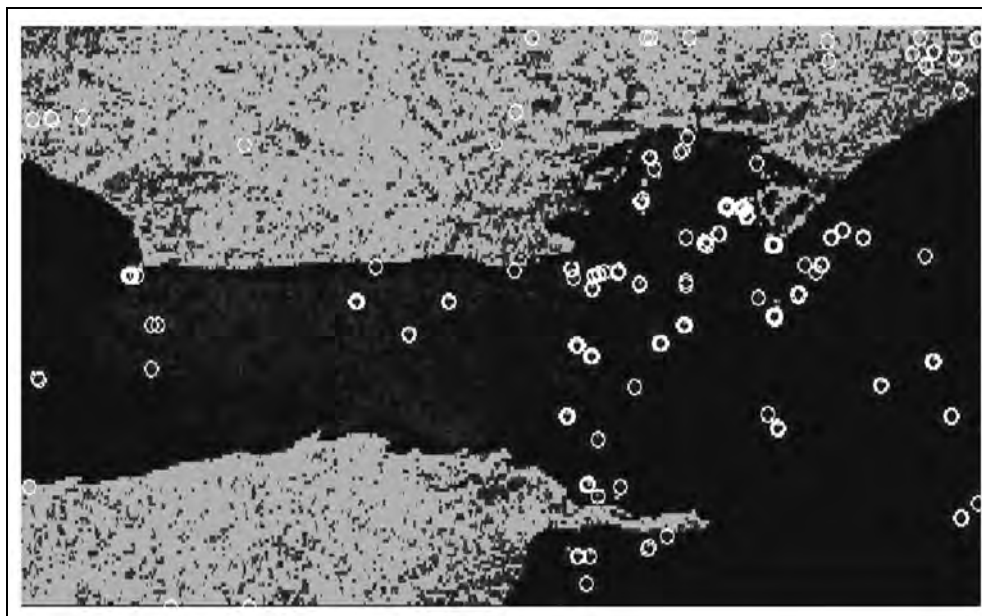
– по 3–4 элемента и т.д. Указанные характеристики реализуются при радиолокационном зондировании с режимами среднего разрешения с расширенной полосой съемки.

Процедура автоматического обнаружения морских целей включает в себя когерентное накопление (синтез первичного РЛИ), некогерентное накопление (фильтрацию ЭРЛИ) и пороговую обработку с использованием плавающего адаптивного порога, учитывающего изменения локальных уровней отражения от морской поверхности.

Для некогерентного накопления первичного РЛИ применяют двумерную оконную фильтрацию, вейвлет-фильтрацию на базисах с разным разрешением, а также комбинированные алгоритмы, основанные на сегментации радиолокационных портретов морских целей [22, 142, 400, 473, 494].

Для повышения вероятности правильного обнаружения возможно применение процедур последовательного анализа с учетом того обстоятельства, что отметки от морских целей в координатах азимут–наклонная дальность имеют явную несимметрию с отношением длины к ширине от 1/10 до 1/7 с учетом высоты надстроек, а также зависимость ЭПР от ракурса цели (резкое увеличение ЭПР при боковых ракурсах наблюдения). Это позволяет ввести в процедуру обнаружения пространственную фильтрацию по ракурсу цели для уменьшения вероятности ложной тревоги.

Двумерная фильтрация первичного РЛИ при автоматическом обнаружении морских целей позволяет реализовать селекцию протяженной поверхности (островов и суши), после которой резко снижается поток ложных отметок от суши, подлежащих изъятию из выходной информации путем сравнения с цифровой географической картой. Иллюстрация работы порогового обнаружителя приведена на рис. 9.5.

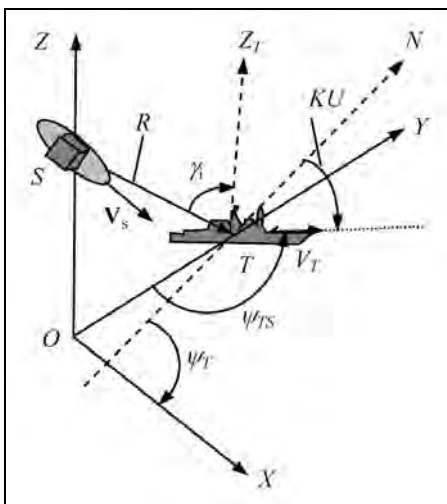


**Рис. 9.5.** Обнаружение морских целей с селекцией сигналов от суши (показана условно)  
(Гибралтарский пролив, РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»)

Кроме отметок от обнаруженных судов в акватории наблюдаются редкие ложные отметки от элементов суши (мелких островов, горных хребтов и др.). Они подлежат исключению из выходной информации путем сравнения их координат с цифровой картой местности или архивными данными, полученными ранее в близких условиях наблюдения.

### 9.3.3. Измерение координат морских целей

Первичное радиолокационное изображение в РСА строится в координатах наклонная дальность (поперек линии пути) и время прохождения нуля доплеровской частоты сигналов от цели. Пересчет из наклонной дальности в горизонтальную, а затем вычисление географических координат цели в соответствии с формулами, приведенными в гл. 5, требует знания текущих гринвичских координат КА, учета локального радиуса земного эллипсоида на широте съемки. Наличие на борту КА системы позиционирования (GPS, ГЛОНАСС) позволяет вычислить удаление цели от следа КА с погрешностью, не превышающей трех–четырёх десятков метров.



**Рис. 9.6.** Геометрия наблюдения движущихся морских целей

При оценке азимутальной координаты обнаруженных морских целей следует иметь в виду смещение отметок по азимуту, вызванное движением цели. Геометрия наблюдения приведена на рис. 9.6 для момента времени  $t = 0$ , когда наблюдаемая цель  $T$  находится в плоскости визирования  $OST$ , нормальной к вектору путевой скорости платформы  $\mathbf{V}_s$ . Величина смещения определяется радиальной составляющей скорости цели, т.е. проекцией скорости цели на линию визирования

$$V_r = V_T \cos \psi_{TS} \sin \gamma_i, \quad (9.4)$$

где  $\psi_{TS}$  – ракурс цели между плоскостью визирования и продольной осью судна;  $\gamma_i$  – угол падения между вектором облучения  $R$  цели и местной вертикалью  $Z_S$  в точке нахождения цели.

Угол ракурса рассчитывают следующим образом:

при обзоре правым бортом

$$\psi_{TS} = \psi_s - KU + 270^\circ; \quad (9.5)$$

при обзоре левым бортом

$$\psi_{TS} = \psi_s - KU + 90^\circ,$$

где  $\psi_s$  – курсовой угол КА, рассчитываемый по формуле (5.53);  $KU$  – курсовой угол НК, который отсчитывают от направления на Север.

При  $\psi_{TS}=0$  корабль наблюдается «в нос», при  $\psi_{TS}=90^\circ$  – в правый борт.

По значению радиальной скорости определяют азимутальное смещение цели и ее азимутальную координату на РЛИ [302]. Величина смещения азимутальной координаты при боковом обзоре равна

$$\Delta X_{Vr} = \frac{V_r R}{V_s} = \frac{R V_T \cos \psi_{TS} \sin \gamma_i}{V_s}. \quad (9.6)$$

При типичных условиях наблюдения – путевой скорости КА  $V_s = 7500$  м/с, дальности наблюдения  $R = 1000$  км, углах падения  $\gamma_i = 30...60^\circ$  и скорости судна 20 узлов ( $V_T = 10$  м/с) погрешность измерения азимута может достигать  $\Delta X_{Vr} = \pm(667...1150)$  м. Такая погрешность измерения координат может быть приемлемой для задач общего обзора надводной обстановки в акваториях океана. Повышение точности измерения азимутальной координаты движущихся морских целей может достигаться путем применения методов индикации движущихся целей, а также путем извлечения информации о возмущениях морской поверхности, вызванных движением судна.

Задача индикации движущихся целей решается использованием в РСА двух приемных каналов, которые в РСА с АФАР подключаются к секциям АФАР, а в РСА с гибридной зеркальной антенной – к пространственно разнесенным облучателям антенны. Методы индикации движущихся целей – продольная интерферометрия или пространственно-частотная фильтрация рассмотрены в подразделе 4.2.4, см. также [37\*, 118, 161\*, 428\*]. Применение этих методов позволит снизить погрешность измерения азимутальной координаты в несколько раз, до сотен метров, что обусловлено низкой точностью измерения радиальной скорости из-за малых размеров интерферометрической базы (или малости углового смещения отметок по ширине азимутальной ДНА) в космических РСА.

Лучшую точность измерения азимутальной координаты движущихся морских целей обеспечивает использование информации о возмущениях на морской поверхности. На рис. 9.7 показано РЛИ пролива Гибралтар, полученное с помощью РСА TerraSAR-X с разрешающей способностью 3 м [530, 536]. По кильватерным следам, образованным движущимися судами, определяют их курс (по направлению следа), азимутальную координату (по месту начала следа), величину радиальной составляющей скорости (по величине азимутального смещения отметки) и, наконец, по формулам (9.4), (9.6) – значения скорости судна. Измерить абсолютную скорость судна можно также по углу, образованному кильватерными следами [449].

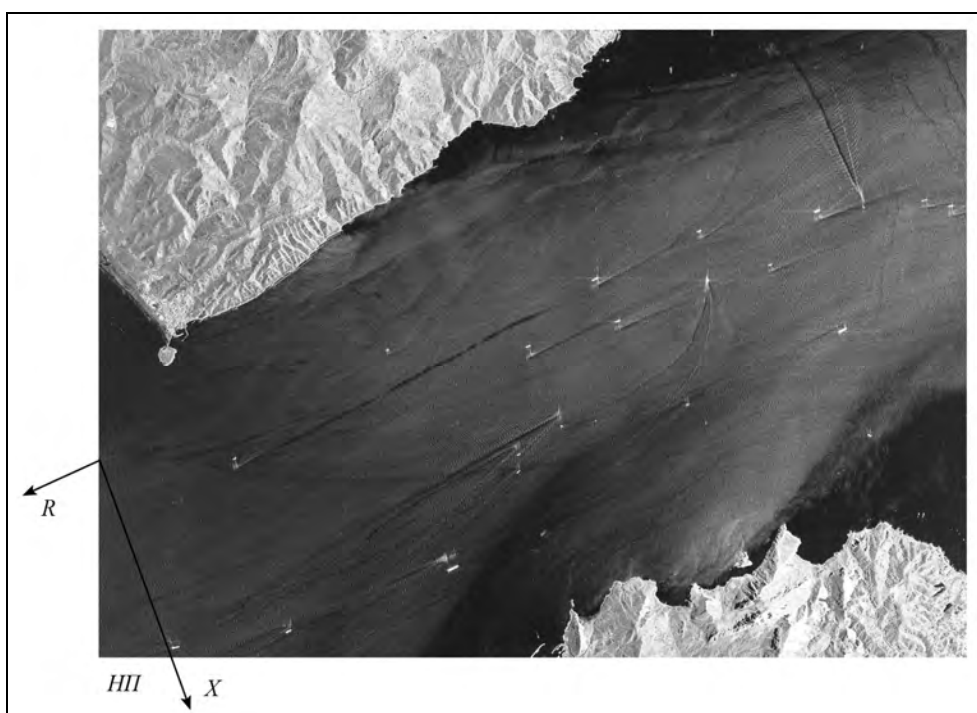
Характерно, что при движении судна к РЛС (положительное доплеровское смещение) отметки от судов появляются позже пересечения плоскости визирования, нормальной к следу КА. При движении судна параллельно следу КА, информация о скорости содержится в угле расхождения «усов» кильватерного следа или в РСА с высоким разрешением может быть определена методом автофокусировки по тангенциальной составляющей скорости движения цели.

Использование рассмотренной информации о возмущениях морской поверхности *для уточнения параметров движения морских целей требует ряда усложнений аппаратуры РСА:*



- повышения разрешающей способности и чувствительности РСА;
- введения канала вертикальной поляризации для получения изображения морской поверхности при больших углах падения;
- применения специальных алгоритмов обработки РЛИ с выделением кильватерных следов и извлечения информации о движении судов.

Сравнение РЛИ, приведенных на рис. 3.7, 7.36 и 9.7, показывает, что наблюдаемость возмущений морской поверхности зависит от параметров РСА, степени волнения моря и курса судна относительно фронта волны. В ряде ситуаций кильватерные следы могут не обнаруживаться на РЛИ.



**Рис. 9.7.** РЛИ надводной обстановки в проливе Гибралтар с наблюдением кильватерных следов (PCA TerraSAR-X, 05.07.2007 [536])

#### **9.3.4. Радиолокационные портреты морских целей**

Повышение разрешающей способности РСА до единиц метров требует пересмотра используемых моделей отражения радиоволн от кораблей и судов. Для случая РСА низкого разрешения, когда элемент разрешения РСА превышает размеры корабля (сложная точечная цель), используют модель отражения от него как  $\chi^2$ -распределение с четырьмя степенями свободы [33\*]. Этот случай характеризуется интерференцией сигналов, отраженных фрагментами корабля с интенсивным отражением (преимущественно – надстройками). При повышении разрешения до единиц метров для описания закона отражения используют метод декомпозиции на «постоянные

симметричные отражатели» (permanent symmetric scatterers). Суммарный сигнал от корабля представляет собой результат некогерентного накопления изображений от его отражающих элементов, что значительно снижает флуктуации сглаженного РЛИ и повышает вероятность обнаружения распознавания класса [240, 283, 489].

Высокая разрешающая способность современных космических РСА позволяет получать радиолокационные портреты морских целей, пригодные для их классификации. Необходимо рассматривать несколько ситуаций: наблюдение неподвижных судов и кораблей на рейде или на стоянках и их обнаружение при движении в условиях морского волнения.

Радиолокационные портреты морских целей формируются конструктивными элементами корабля (судна), образующими доминантные центры отражения, которые по своим статистическим характеристикам близки к постоянным отражателям, но в пределах изменения ракурса, не превышающего  $\pm 20^\circ$ , когда можно пренебречь эффектами затенения одних элементов конструкции другими. Координаты наклонная дальность–азимут для центров отражения находят путем пересчета их трехмерных координат в плоскость визирования с учетом углов падения и ракурса наблюдения согласно рис. 9.6:

$$X_i = X_c + x_i \sin \psi_{SP}; \quad (9.7)$$

$$R_i = R_c + y_i \cos \psi_{SP} \sin \gamma_i - z_i \cos \gamma_i,$$

где  $X_c$  – координата центра масс корабля вдоль линии пути;  $R_c$  – координата центра масс корабля по наклонной дальности, рассчитываемая по формулам (3.4)–(3.8) с учетом удаления корабля  $Y_c$  от следа КА, текущего радиуса орбиты КА  $R_s$  и радиуса земного эллипсоида  $R_e$  на географической широте точки наблюдения (предполагаем обнаружение на уровне моря);  $x_i, y_i$  – координаты  $i$ -го центра отражения относительно центра масс корабля.

Форма комплексного радиолокационного портрета цели в координатах  $R, X$  определится сверткой точечного портрета с двумерной функцией импульсного отклика РСА

$$\dot{U}(R, X) = \sqrt{Q} \sum_{i=1}^N \sqrt{\sigma_i} \exp \left\{ -jK_x \sqrt{R_i^2 + X_i^2} \right\} \otimes h(R, X), \quad (9.8)$$

где  $N$  – число доминантных центров отражения цели;  $Q$  – множитель пропорциональности между ЭПР отражателя и отсчетами мощности выходного ЭРЛИ;  $\sigma_i$  – ЭПР локального центра отражения;  $K_x$  – волновое число;  $h(R, X)$  – нормированная функция импульсного отклика РСА;  $R, X$  – координаты функции отклика на выходном КРЛИ.

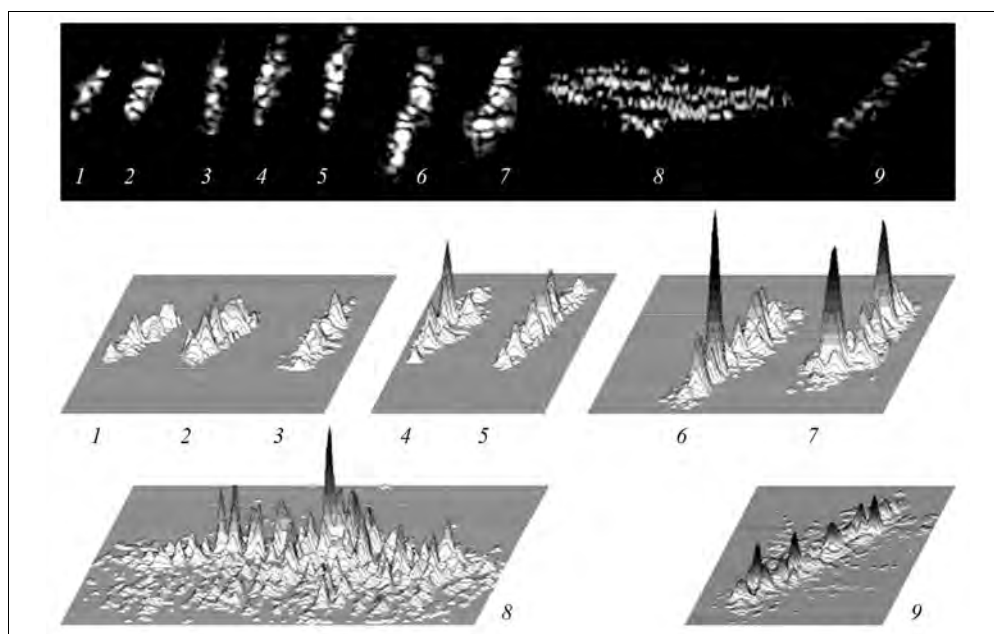
Изменчивость получаемых радиолокационных портретов на РЛИ зависит от геометрии отражающих фрагментов корабля (судна) и их взаимного расположения, определяющего интерференцию сигналов в элементе разрешения РСА в зависимости от ракурса наблюдения. Считается, что модель отраженного сигнала может быть представлена в виде набора постоянных отражателей, которые сохраняют свою геометрию при изменении ракурса в пределах  $\pm 20^\circ$ . При дальнейшем повороте часть отражателей затеняются и появляются другие отражатели. При формировании радиолокационного портрета имеет значение также отражение от морской

поверхности, образующей с отражателями корабля двугранные углы, которые дают отметки на РЛИ при большей дальности, чем от прямых отражателей. Особенно такое явление возникает при бортовых ракурсах наблюдения морских целей.

Решение задачи классификации морских целей требует создания банка радиолокационных данных и инструмента, позволяющего учесть условия наблюдения и конкретные параметры РСА. Для формирования банка данных целесообразно «препарировать» материалы (КРЛИ) конкретных радиолокационных съемок надводной обстановки и представить их в виде наборов точечных отражателей с использованием процедур, аналогичных процедуре «скелетизации», рассмотренной в подразделе 9.2.2. Такую же процедуру «препарирования» можно предусмотреть для полученных РЛИ кораблей с целью компенсации искажений, вызванных качкой и рысканьем в алгоритмах классификации морских целей.

Преимущество такого подхода состоит в возможности моделирования ожидаемых РЛ-портретов для конкретных условий наблюдения и параметров РСА путем разворота точечных комплексных моделей морских целей с приведением к ракурсу и углу места наблюдения и сверткой с характеристикой двумерного фильтра импульсного отклика РСА в конкретном рабочем режиме.

На рис. 9.8 представлены радиолокационные портреты основных типов кораблей на стоянках в бухте, полученные с помощью РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1» с разрешающей способностью около 8 м. Геометрические размеры кораблей приведены в табл. 9.1.



**Рис. 9.8.** Яркостные и рельефные радиолокационные портреты кораблей с оценками их ЭПР: 1 – эсминец,  $\sigma=3500 \text{ м}^2$ ; 2 – БПК,  $\sigma=6060 \text{ м}^2$ ; 3 – МПК,  $\sigma=3900 \text{ м}^2$ ; 4 – БПК,  $\sigma=6500 \text{ м}^2$ ; 5 – БПК,  $\sigma=7360 \text{ м}^2$ ; 6 – крейсер,  $\sigma=16920 \text{ м}^2$ ; 7 – крейсер,  $\sigma=16050 \text{ м}^2$ ; 8 – тяжелый авианесущий ракетный крейсер (ТАРКР),  $\sigma=41600 \text{ м}^2$ ; 9 – сухогруз,  $\sigma=3600 \text{ м}^2$

Таблица 9.1. Геометрические размеры надводных кораблей и экспериментальные данные по ЭПР надводных кораблей [153\*, 516]

Тип НК	Длина, м	Ширина, м	Максимальная высота, м	ЭПР, м <sup>2</sup>
Тяжелый авианесущий ракетный крейсер	302,3	71	~50	$42 \cdot 10^3$
БПК (1134А/Б)	152,0/173,2	16,2/18,2	~28,6	$(6-7,4) \cdot 10^3$
Эсминец	126,5-181,7	13,0-18,6	~19,46	$(3,5-4) \cdot 10^3$
МПК (1124)	71,2	10,5	~16,7	$(3,5-4) \cdot 10^3$
Крейсер	251	28	~50	$(16-20) \cdot 10^3$
Сухогруз, танкер	141-430	16,5-60	до 50	$\geq 3500$

На рис. 9.9 приведены яркостной и рельефный РЛ-портреты судна (предположительно порожний сухогруз) при разрешающей способности РСА 3,5 м. Кроме нескольких доминантных отражателей на корме имеем близкую к точечным отражателям разреженную структуру по корме палубы.

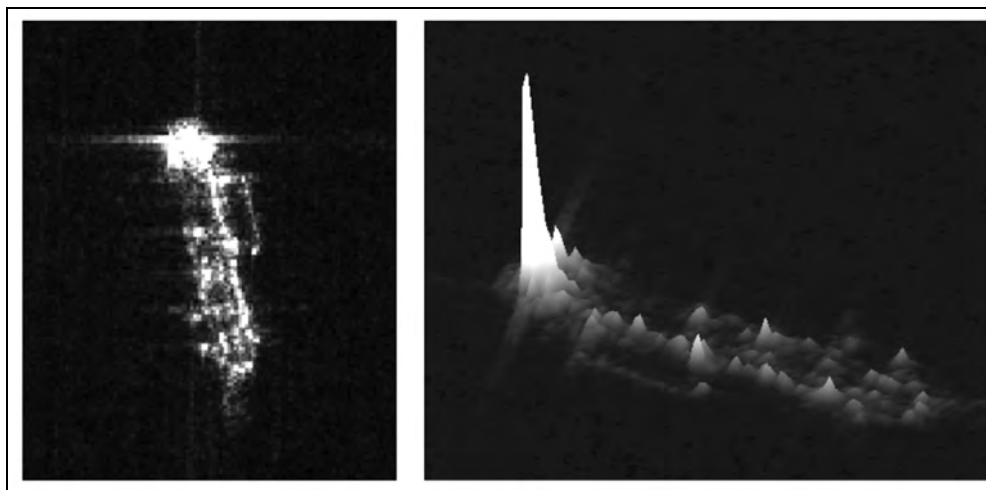


Рис. 9.9. Яркостный и рельефный радиолокационные портреты судна (РСА «Компакт», X-диапазон, разрешение 3,5 м)

Для малых кораблей (эсминец – 1, малый противолодочный корабль – 3 на рис. 9.8) характерно наличие многих центров отражения (до 5–8) с примерно равными ЭПР. После некогерентного накопления будем иметь закон распределения, близкий к нормальному с СКО 0,36...0,46 от среднего значения ( $\chi^2$ -распределение с числом степеней свободы 10...16). Для больших кораблей центров отражения мало, но каждый из них практически не флуктуирует при изменении ракурса наблюдения, что обеспечивает близкое к постоянному среднее значение ЭПР.

**9.3.5. Радиолокационные портреты движущихся целей  
в условиях морского волнения**

При движении кораблей и судов в условиях морского волнения отдельные их отражающие элементы совершают колебательные движения, вызванные бортовой и килевой качкой и рысканьем, которые носят периодический характер. Они приводят к смещениям отметок на РЛИ по азимуту, величина которых связана с радиальной скоростью элемента формулой (9.6), примененной к каждому центру отражения. Радиальные скорости элементов определяются их положением относительно центра масс корабля с периодом качки и углом отклонения корабля от нормального положения

$$\gamma = \gamma_{\max} \sin(2\pi t/T_k), \quad (9.9)$$

где  $T_k$  – период колебаний, который для крупных морских целей определяется их конструкцией и не зависит от степени морского волнения.

Для крейсера период колебаний составляет 5...15 с, а для авианосца – 10...35 с. С уменьшением водоизмещения корабля период колебаний имеет случайный характер и зависит от степени волнения моря. Колебания по курсу (рысканье), крену (бортовая качка) и киле можно считать узкополосным случайным процессом.

При синтезе РЛИ имеет значение соотношение между временем синтеза и периодом качки корабля. Если время синтеза много меньше периода колебаний, то движение отражающего элемента корабля можно считать линейным и учитывать только смещение отметки по азимуту, пренебрегая дефокусировкой. В случае РСА высокого разрешения, когда время синтеза становится соизмеримым с периодом качки, следует принимать меры для компенсации фазовых ошибок, в том числе и методами автофокусировки.

На рис. 9.10 показан характер искажений РЛИ портретов кораблей при двух ракурсах наблюдения (90 и 45°) и наличии азимутальных смещений отметок, вызванных радиальными скоростями отражающих элементов корабля (дефокусировкой пренебрегаем). При качке разные элементы корабля на разной высоте от палубы имеют разные линейные скорости, поэтому отметки от них смещаются по азимуту на разное расстояние.

Изменение ракурса корабля само по себе приводит к изменению геометрии радиолокационного портрета и к нему добавляются геометрические искажения – смещения отметок от качки и рысканья.

На рис. 9.11 приведены типичные радиолокационные портреты движущихся судов (кораблей) разного типа в Тихом океане (Японское море, остров Осима, виток 2024н, см. РЛИ на рис. 7.36) и в проливе Гибралтар (виток 2005, см. РЛИ на рис. 3.7) при скорости приводного ветра 5...8 м/с (умеренный ветер). Разрешающая способность РЛИ ~8 м. В своем большинстве отметки несут информацию о размерах, форме и распределении ярких отражателей в объектах наблюдения. Из особенностей следует отметить ярко выраженные отметки, вызванные переотражением от морской поверхности (рис. 9.11, Gib42, s34, s61).

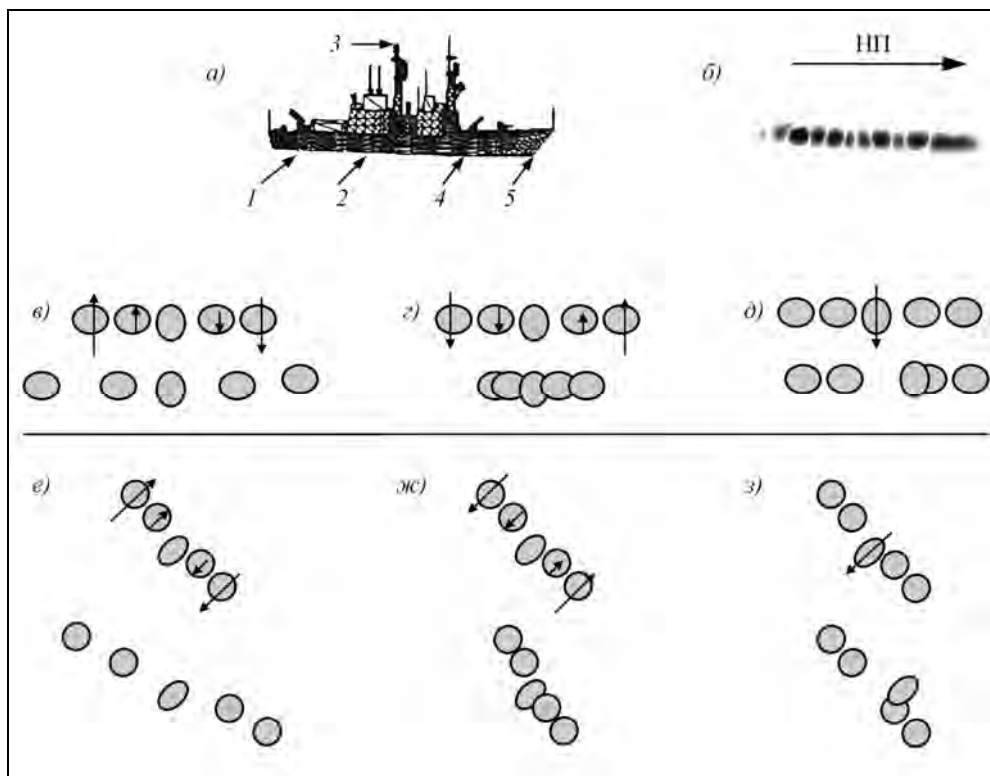
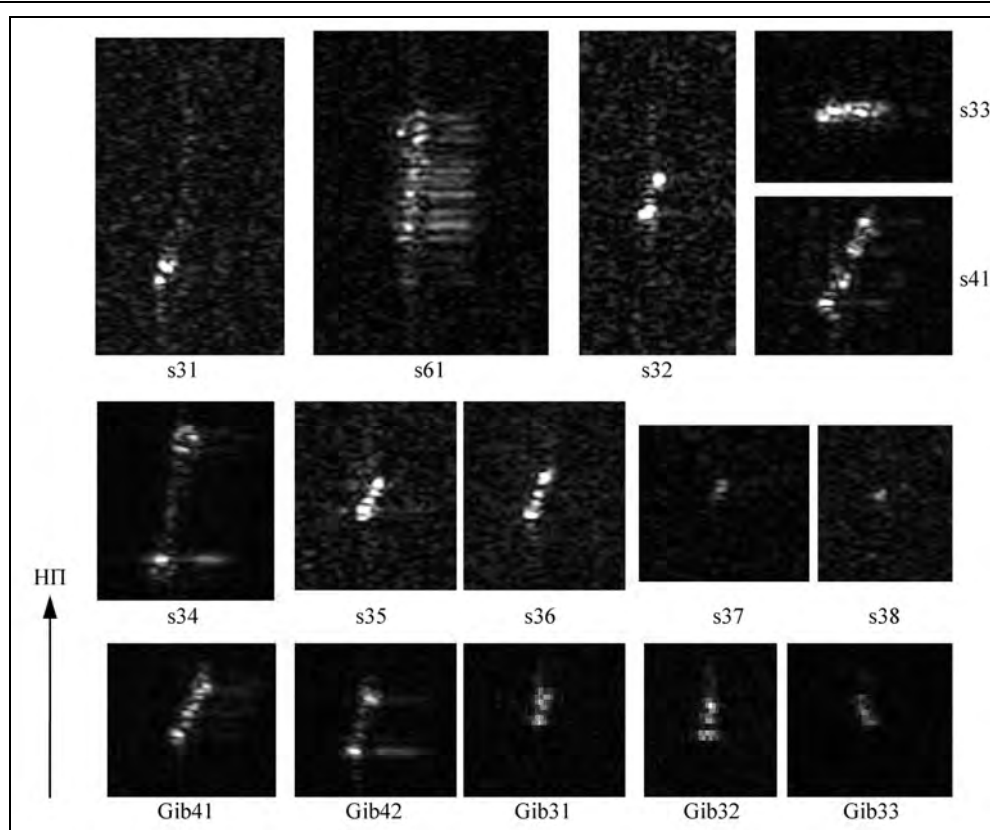


Рис. 9.10. Искажения радиолокационных портретов кораблей (НК), вызванные качкой и рысканием:

*а* – общий вид корабля (показаны отражающие точки 1–5); *б* – радиолокационный портрет НК при ракурсе наблюдения  $90^\circ$ ; *в* – геометрические искажения при рыскании по часовой стрелке (показаны векторы радиальных скоростей и изменения положения отметок); *г* – рыскание против часовой стрелки; *д* – бортовая качка (движение надстройки в сторону РЛС); *е–з* – искажения, вызванные рысканием и качкой при ракурсе наблюдения НК, равном  $45^\circ$

Одиночные отметки переотражения предположительно от кормовых надстроек характерны для сухогруза (Gib42) и танкера (s34). Более выражены отметки переотражения для снимка s61 (предположительно военный корабль), подчеркивающие наличие высоких надстроек по всей длине. Наличие отметок переотражения затрудняет оценку размеров морской цели, но в то же время является дополнительным информационным признаком о количестве и высоте надстроек наблюдаемого объекта.

Из представленного набора РЛ-портретов морских целей два могут рассматриваться как аномальные – s31 и s32. Оба они характеризуются большой яркостью, но азимутальные размеры отметок, как для катера (30...70 м), не соответствуют наблюдаемой ЭПР. Можно предположить, что такой вид отметок от кораблей обусловлен влиянием рысканья, как на рис. 9.10, г. Это подтверждается тем, что в азимутальном направлении видны области повышенной яркости, которые могут относиться к отражению от элементов корабля с меньшим влиянием искажающих воздействий.



**Рис. 9.11.** Радиолокационные портреты судов (кораблей) разных типов в Японском море (s...) и в Гибралтарском проливе (Gib...): скорость приводного ветра 5...8 м/с; направление обзора – слева (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»)

### 9.3.6. Классификация морских целей

Вопросам классификации морских целей при радиолокационном обзоре посвящен ряд публикаций [142, 240, 487, 489]. Важным аспектом решения этой задачи является выбор набора классификационных признаков с учетом реализуемого разрешения проектируемой РСА.

В результате анализа возможных алгоритмов классификации морских целей с учетом изменчивости радиолокационных портретов в зависимости от реализуемой разрешающей способности РСА и влияния волнения моря разработаны рекомендации по формированию банка эталонов для классификации в виде наборов точечных трехмерных моделей надводных кораблей и судов с шагом по углу ракурса через 20°. Такие модели могут быть сформированы на основе комплексных РЛИ, полученных с помощью космического РСА со средним и высоким разрешением (до 10 м), путем применения процедур «скелетизации», рассмотренных в подразделе 9.2.2.

Преимущества таких эталонов состоят в их компактности, а также в возможности гибко формировать образцы ожидаемых РЛИ эталонных кораблей с учетом параметров обзора и измеренного ракурса наблюдаемого объекта.

Используемые для распознавания кораблей векторы признаков включают в себя:

- 1) суммарную ЭПР наблюдаемой цели;
- 2) площадь (число пикселей РЛИ) «силуэта» цели в координатах наклонная дальность – азимут, вычисленного по пороговым уровням с включением и исключением отметок, переотраженных от морской поверхности;
- 3) длину отметки (диагональ);
- 4) ширину отметки с учетом высоты надстроек;
- 5) распределение доминантных точек отражения и т.д.

Рекомендованы методы учета искажений радиолокационного портрета корабля, вызванных качкой и рысканьем путем расширения набора эталонов.

Для задач контроля надводной обстановки предпочтительнее использовать излучение с горизонтальной поляризацией с возможностью приема двух поляризаций для повышения энергетического потенциала и вероятности распознавания целей. Это позволит расширить полосу съемки в область малых углов падения, где для подавления сигналов от моря можно работать на перекрестной поляризации. Для исключения влияния гидрометеоров, особенно в тропических широтах, желательна работа РСА в *S*- или *L*-диапазонах волн.

Период обновления информации о надводной обстановке определяется реализуемой полосой съемки (включая двусторонний обзор) и составом орбитальной группировки. Реализация широкой полосы съемки, особенно в области больших углов падения (до  $70^\circ$ ), требует применения антенн с большой эффективной площадью для устранения неоднозначности принимаемых сигналов и повышения энергетического потенциала. Необходим также поиск компромисса по определению требований к разрешающей способности РСА в режиме Скансар, исходя из энергетического потенциала РСА и вероятности распознавания классов морских целей.

Для удовлетворения этим требованиям перспективно применение в РСА гибридных зеркальных антенн с АФАР-облучателями (АФАР-ГЗА). Применение в таких АФАР-ГЗА поляриметрических приемопередающих модулей (ППМ) с цифровым управлением фазы и амплитуды на излучение и цифровым выходом на прием позволит преодолеть ограничения разрешающей способности, присущие режиму Скансар (см. подраздел 4.2.2), и реализовать гибкое управление ресурсами РСА для оптимизации задач обнаружения, определения координат и классификации морских целей. Эффективно применение методов последовательного анализа получаемых данных с возможностью введения дополнительных засветок участка наблюдения с адаптацией параметров зондирующего сигнала, в том числе с кратковременным использованием форсированного режима излучения.

Для контроля трафика судов, а также зон рыбной ловли целесообразно сочетание космического радиолокационного обзора с обработкой информации от аппаратуры идентификации судов [267].



Анализ имеющихся материалов радиолокационной съемки морских целей показывает, что комплексное использование информационных признаков, содержащихся в РЛИ (суммарная энергия, геометрические размеры отметок и их конфигурация в сочетании с дополнительной информацией о состоянии морской поверхности), дает возможность разделения наблюдаемых морских целей на 5–8 и более классов, точное количество которых зависит от технических характеристик РСА, в первую очередь, от разрешающей способности.

## **9.4. Дистанционное зондирование морской поверхности**

### **9.4.1. Задачи дистанционного зондирования морской поверхности**

Дистанционное зондирование морской поверхности предназначено для решения следующих задач:

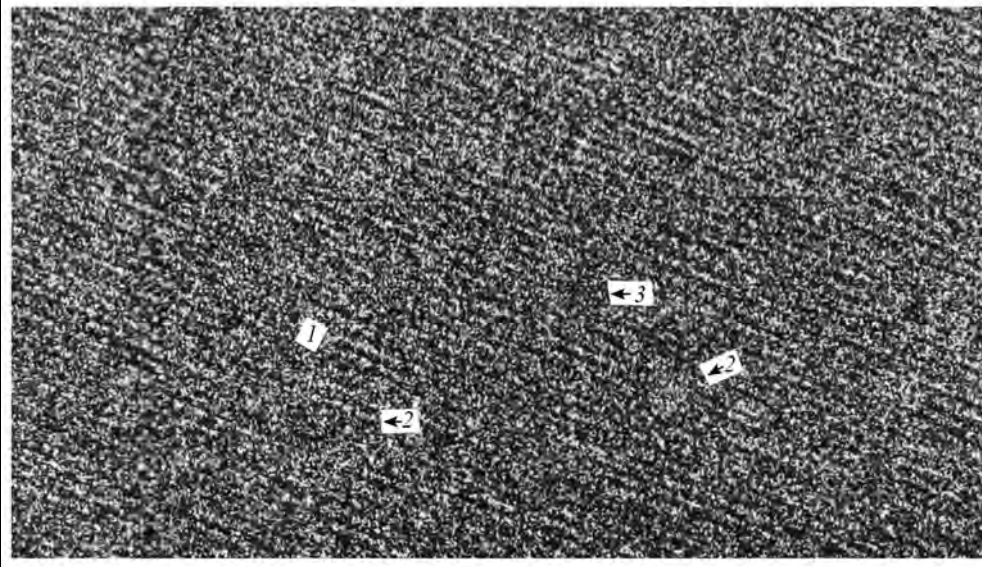
- 1) климатические исследования взаимодействия океан–атмосфера;
- 2) изучение морских течений;
- 3) исследование активных пленок, выявление областей загрязнений, экологический мониторинг морских акваторий;
- 4) исследование внутренних волн, характеризующих топографию морского дна, шельфовых зон (радиотомография морской поверхности);
- 5) обнаружение движущихся надводных и подводных объектов;
- 6) обнаружение опасных волновых явлений и их предвестников.

Решение перечисленных задач, как правило, включает в себя обнаружение «аномалий» на РЛИ морской поверхности, их распознавание и интерпретацию, в том числе и для обнаружения движущихся подводных объектов [190, 281, 361, 509].

### **9.4.2. Обнаружение эффектов взаимодействия взволнованной морской поверхности с атмосферой**

Как было отмечено в разделе 2.9, амплитудное (энергетическое) радиолокационное изображение водной поверхности образуется благодаря механизму брэгговского рассеяния – модуляции ряби, имеющей длину волны, резонансную по отношению к радиоволне зондирующего сигнала РСА. Модуляция отраженного сигнала вызвана изменением поверхностного натяжения на профиле морских волн (ветровых, внутренних, волн зыби), наличием поверхностно активных пленок или различными возмущающими факторами (вихри, ветровая тень, плавающие объекты и др.) [98, 135].

При пространственном разрешении РСА 30 м и лучше ветровые волны отчетливо видны на РЛИ, а их структура и системы волн выявляются путем спектрального анализа РЛИ. Текстурный анализ позволяет выявить нарушение периодической структуры волнения, связанного с атмосферными воздействиями. На рис. 9.12 показан фрагмент РЛИ морской поверхности, иллюстрирующий эффекты взаимодействия океан–атмосфера (образование кольцевых структур) при зондировании в S-диапазоне волн с горизонтальной поляризацией.



**Рис. 9.12.** РЛИ морской поверхности с развитым ветровым волнением и образованием кольцевых структур в результате взаимодействия океан – атмосфера:  
 1 – ветровые волны ( $\Lambda = 150\text{--}200$  м); 2 – ринги;  
 3 – области подавления ряби (РСА «Меч-К» КА «Космос-1870»)

Широко известны методы измерения параметров ветровых волн и скорости приводного ветра, использующие скаттерометры. Метод измерений основан на зависимости УЭПР морской поверхности от угла между плоскостью визирования и фронтом ветровых волн. Отраженный от моря сигнал формируется мелкими (брегговскими) волнами – рябью, которая модулируется крупной ветровой волной из-за изменения локальных уклонов фрагментов поверхности, а также при нелинейном взаимодействии мелких и крупных волн (имеет место усиление интенсивности мелких волн на переднем склоне крупных волн). При использовании известной спектральной модели развитых ветровых волн (спектр Пирсона – Московича) она определяется выражением [444]

$$S^0(\theta) = (a_0/8) |\gamma(\varepsilon, \theta)|^2 \eta(\lambda) \operatorname{ctg}^4 \theta, \quad (9.10)$$

где во избежание путаницы с СКО уклонов ( $\sigma_{\theta_x}$ ,  $\sigma_{\theta_y}$  далее в тексте) символом  $S^0$  обозначена УЭПР ( $\sigma^0$ ) на площадке наблюдения;  $\theta$  – локальный угол визирования между направлением излучения и нормалью к фрагменту морской поверхности;  $a_0 = 6,5 \cdot 10^{-6}$  – средний коэффициент отражения;  $\gamma(\varepsilon, \theta)$  – комплексный коэффициент, учитывающий поляризационные свойства принятых сигналов;  $\varepsilon$  – комплексная диэлектрическая проницаемость водной поверхности, зависящая от температуры, солености и длины волны  $\lambda$  радиолокатора [227];  $\eta(\lambda)$  – коэффициент, учитывающий гравитационно-капиллярную область спектра волн [174\*].

Рассмотрим основные соотношения для общего случая поляриметрического зондирования. Для рабочей области углов визирования ( $\theta = 30 \dots 70^\circ$ ) зависимость (9.10) можно аппроксимировать экспонентой относительно некоего среднего угла визирования  $\theta_0$ :

$$S^0 = S^0(\theta_0) \exp\{-m(\theta - \theta_0) / \theta_0\}, \quad (9.11)$$

где для ВВ-составляющей имеем  $m_{VV} = 2,7$ , а для ГГ-составляющей  $m_{HH} = 7,8$ . Влияние крупной структуры принято оценивать, учитывая два фактора: «геометрический» (угловую модуляцию нормали к малой площадке, содержащей мелкие волны), а также «модуляционный», природа которого определяется взаимодействием мелких волн с локальным течением, т.е. с орбитальной скоростью крупной волны. Вторым фактором пренебрегаем.

Проведенные в [178] расчеты значений УЭПР моря при поляриметрическом зондировании ВВ+ВГ привели к формулам

$$\overline{S_{VV}^0} = S_{VV}^0(\theta_0) \left[ 1 + \frac{m_{VV}^2 \sigma_{\theta x}^2}{4\theta_0^2} - \sigma_{\theta y}^2 \left( 1 + \frac{m_{VV}^2 \sigma_{\theta x}^2}{\theta_0^2} \right) \right]; \quad (9.12)$$

$$\overline{S_{VH}^0} = S_{VV}^0(\theta_0) \frac{\sigma_{\theta y}^2}{2} \left( 1 + \frac{m_{VV}^2 \sigma_{\theta x}^2}{\theta_0^2} \right), \quad (9.13)$$

где  $\sigma_{\theta x}$  и  $\sigma_{\theta y}$  – СКО уклонов волн вдоль и поперек трассы КА с учетом развитого волнения;  $\theta_0$  – угол визирования для горизонтальной площадки (обычно обозначаемый как угол падения  $\gamma_i$ ). Из формул (9.3) и (9.4) видно, что УЭПР на перекрестной поляризации почти полностью определяется величиной  $\sigma_{\theta y}^2$ , а на соосной поляризации УЭПР слабо зависит как от  $\sigma_{\theta x}^2$  так и от  $\sigma_{\theta y}^2$ . Величина же  $S_{VV}^0(\theta_0)$ , включающая амплитудную модуляцию УЭПР, одинакова для обеих поляризационных составляющих.

Модельные представления [174\*, 175\*] показывают, что при интегрировании пространственных спектров уклонов и высот развитых ветровых волн  $\Psi(k)$  в пределах от  $k=0$  до  $k=2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны радиолокатора), наблюдаемые «в точке» дисперсии уклонов  $\sigma_\theta^2$  и высот  $\sigma_h^2$ , имеют значения:

$$\sigma_\theta^2 \cong a_0 \ln \left( \frac{5,8W^2}{\lambda g} \right); \quad (9.14)$$

$$\sigma_h^2 \cong a_0 \left( 0,74 \frac{W^4}{g^2} \right), \quad (9.15)$$

где  $W$  – скорость приводного ветра. Дисперсия уклонов (9.14) возрастает с уменьшением длины волны РЛС, что обусловлено формой спектра Пирсона – Московича.

Измеряемые радиолокатором параметры волнения целесообразно отнести к скорости ветра того же направления (вдоль  $W_x$  и поперек  $W_y$  трассы КА). Отношение СКО уклонов  $q = \sigma_{\theta y} / \sigma_{\theta x}$  характеризует анизотропию процесса. Она в зависимо-

сти от направления ветра может изменяться в пределах от  $q = 0,7 \dots 1,4$  (дисперсии уклонов при этом изменяются в 4 раза). Главный вклад ( $q \approx 1$ ) вносят почти изотропные гравитационно-капиллярные волны, а отличие  $q$  от единицы обусловлено пологими энергонесущими волнами.

В случае скаттерометра с многолучевой антенной системой, например при круговом сканировании под фиксированным углом  $\theta_0$  к надиру, в принципе можно разделить составляющие  $\sigma_{\theta x}$  и  $\sigma_{\theta y}$  вдоль и поперек линии пути, а также определить направление ветра. Скорость ветра можно грубо определить по измеряемой усредненной величине  $\sigma_{\theta}$ . В существующем СВЧ-скаттерометре QUIKSCAT применяется другой алгоритм обработки, использующий зависимость УЭПР  $S_{VV}^0$  от направления и скорости ветра, минуя измерение параметров волнения. Недостаток скаттерометрических измерений – низкое пространственное разрешение и большие размеры зоны усреднения, определяемые расстояниями между лучами (десятки и более километров).

Для исследования перечисленных выше явлений могут использоваться РСА, работающие в любом из традиционных диапазонов волн ( $X, C, S, L$ ). Наличие поляризметрического режима (две поляризации с возможностью выбора комбинаций ВВГ или ГГВ) позволяет получить более детальную информацию об атмосферных явлениях и расширить рабочий диапазон углов падения.

В связи с тем, что для рассмотренных явлений характерна однородность в пределах больших площадей целесообразно введение в РСА специального «морского» режима для съемки фрагментов морской поверхности площадью  $20 \times 20 \text{ км}^2$ , как это реализовано в РСА ERS-1/2. Съемка возможна в фоновом режиме, сочетающимся с выполнением основных задач.

### **9.4.3. Оценка скорости морских течений**

Оценка скорости морских течений является важной составляющей мониторинга морской поверхности. По своей природе течения являются динамическим объектом, параметры которого имеют суточные (вызванные приливными явлениями) и сезонные изменения, а также вызванные другими факторами. При радиолокационном зондировании амплитуда РЛИ морской поверхности не фиксирует постоянной составляющей скорости течений, а только ее градиент [63\*, 69\*, 176\*].

Для измерения скорости течений могут быть использованы методы индикации движущихся целей, основанные на интерферометрии вдоль линии пути. Однако для космических РСА измерение радиальной составляющей скорости в доли метра в секунду при пространственном разрешении порядка десятков метров требует размера интерферометрической базы, реализуемой только при бистатистическом построении (тандеме) радиолокационной системы.

Во многих ситуациях ширина морского течения превышает несколько километров и для измерения его скорости можно воспользоваться известными методами измерения доплеровской частоты в луче ДНА (измерение положения доплеровского центроида, используемое при синтезе РЛИ для оптимизации опорной функции [69\*, 164\*, 250, 289, 323, 396, 435\*, 503]).

Измеренная доплеровская частота пересчитывается к значению радиальной скорости, по которой через известные из условий съемки углы падения и ракурс наблюдения (в сопоставлении с географическими данными) вычисляют скорость течения

$$V = \frac{F_{\text{Dop}} \lambda}{2 \sin \gamma_i \cos \psi_{SP}}, \quad (9.16)$$

где  $\gamma_i$  – угол падения между вектором облучения  $R$  и местной вертикалью  $Z_T$  в точке наблюдения (см. геометрию наблюдения, показанную на рис. 9.6;  $\psi_{SP}$  – угол между плоскостью визирования и направлением течения;  $F_{\text{Dop}}$  – измеренная доплеровская частота;  $\lambda$  – длина волны РСА.

Применительно к наблюдению морской поверхности с низким коэффициентом отражения (для углов падения  $30^\circ$  и выше) имеется ряд факторов, ухудшающих точность оценки средней доплеровской частоты в ДНА. К ним относятся низкое отношение сигнал/шум для отражения от морской поверхности, неравномерность локальной отражающей способности (при попадании в луч островов или фрагментов суши).

Кроме указанных факторов необходим учет ошибок измерения параметров орбитального движения и ориентации КА, а также флуктуационных ошибок измерений частоты спектра доплеровских частот, ширина которого определяется путевой скоростью КА  $V_s$  и горизонтальным размером антенны  $D_{\text{xant}}$

$$\Delta F_{\text{Dop}} = \frac{2V_s}{D_{\text{xant}}}. \quad (9.17)$$

При типичных размерах антенны РСА ( $D_{\text{xant}} = 5 \dots 10$  м) ширина спектра составляет  $\Delta F_{\text{Dop}} = 1500 \dots 3000$  Гц. СКО однократного измерения частоты составляет  $\sigma_{F_{\text{Dop}}} \approx \approx (0,2 \dots 0,29) \Delta F_{\text{Dop}}$  в зависимости от отношения сигнал/шум. Поэтому для получения малой флуктуационной ошибки измерения доплеровского смещения (и радиальной скорости) требуется усреднение результатов измерений по каналам дальности.

Используемые методы измерения доплеровской частоты, в конечном счете, сводятся к оценке формы принимаемого спектра доплеровских частот. Так, например, используют оценку по центру тяжести спектра или путем вычисления разности фаз коэффициента корреляции соседних отсчетов [503]. Такие оценки при малом отношении сигнал/шум дают систематическую ошибку измерений тем большую, чем больше отличие средней доплеровской частоты от нулевого значения. Ошибка измерений обусловлена тем, что выборки шума в каждом канале дальности с тактом, равным периоду повторения зондирующего сигнала, некоррелированы и измеренное по ним среднее значение доплеровской частоты равно нулю. В измерителе частоты происходит взвешенное суммирование спектра сигнала со средней доплеровской частотой, отличной от нуля, и шума с нулевой средней частотой.

Для исключения систематической погрешности необходимо применение следящего измерителя доплеровской частоты, который гетеродинирует суммарный процесс к нулевой частоте, когда спектры шума и сигнала имеют равные (нулевые) средние частоты.

Интерференционный характер отражения от элементов земной поверхности вызывает резкие изменения мгновенного доплеровского спектра, формируемого ДНА. Для уменьшения негативного влияния модуляции принимаемого сигнала на положение доплеровского centroида возможно применение процедуры сглаживания [164\*, 435\*]. Она основана на обратимости алгоритмов формирования радиоголограммы и синтеза РЛИ (см. гл. 10) и включает в себя следующие этапы:

- выделение протяженного фрагмента радиоголограммы, существенно превышающего ширину ДНА по азимуту;
- формирование комплексного РЛИ путем сжатия по дальности и азимуту без учета миграции дальности. Взвешивающее окно по азимуту – прямоугольное;
- сглаживание КРЛИ с нормировкой амплитуды в каждом пикселе;
- обратное преобразование КРЛИ в азимутальном направлении (во временную область) с использованием комплексно-сопряженной опорной функции;
- разделение полученной радиоголограммы на фрагменты, в которых производится измерение доплеровской частоты с использованием следящего измерителя.

Большинство современных космических РСА используют платформы, ориентированные с высокой точностью (лучше  $0,1^\circ$ ) в подвижной путевой (гринвичской) системе координат, что гарантирует отсутствие смещений доплеровской частоты, кратных частоте повторения зондирующего сигнала. Тем не менее, малые отклонения КА от точной ориентации по курсу и тангажу могут дать погрешности измерения доплеровской частоты. Они могут быть учтены путем измерения доплеровской частоты в начале, центре и на дальней границе полосы съемки для начала и конца маршрута (в том числе и со съемкой суши для получения опорной информации). По этим данным и приведенной ниже формуле строится поле поправок для уточнения результатов измерений

$$F_{\text{Dop}} = \frac{4\pi}{\lambda} \omega_{\text{sg}} R_s \{ -\sin \psi \sin \gamma_i + \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma_i \}, \quad (9.18)$$

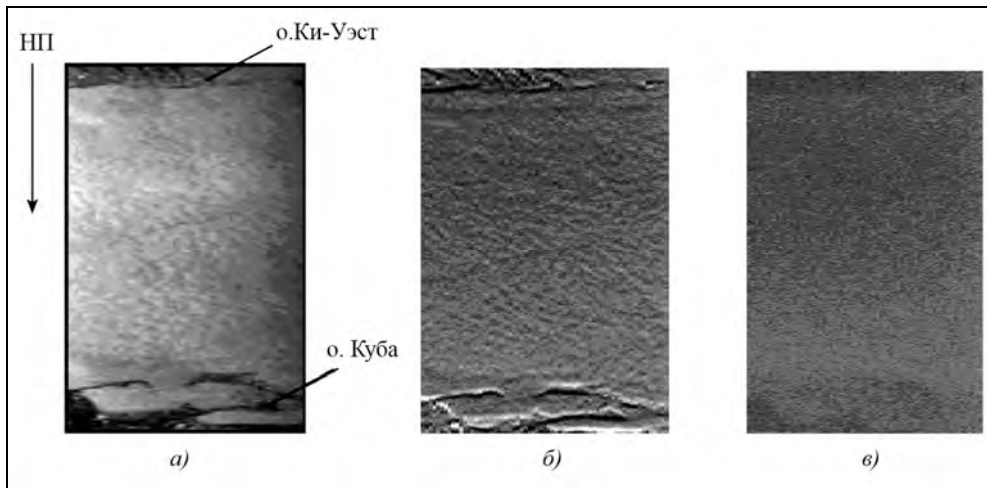
где  $\omega_{\text{sg}}$  – текущая угловая скорость КА в гринвичской системе координат;  $R_s$  – текущий радиус орбиты КА;  $\psi$ , и  $\vartheta$  – отклонения по курсу и тангажу;  $\gamma_i$  – угол падения.

На рис. 9.13 и 9.14 дано сравнение результатов измерений поля течений во Флоридском проливе по радиоголограммам ERS-2 без сглаживания амплитудных неравномерностей [69\*] и с применением процедуры сглаживания. На рис. 9.13,а показано РЛИ участка пролива между островами Куба и Ки-Уэст. Оно имеет типичный для условий работы РСА ERS-1/2 вид – темные отметки от островов (вверху и внизу снимка) и светлое поле изображения морской поверхности со структурами, образованными ветровым волнением. Модуляция яркости РЛИ при обычном методе измерений доплеровской частоты приводит к ошибкам – наблюдаемым на рис. 9.13,б перепадам на градиентах яркости, которые в значительной степени подавляются при использовании рассмотренной процедуры сглаживания амплитудных неравномерностей (см. рис. 9.13,в).

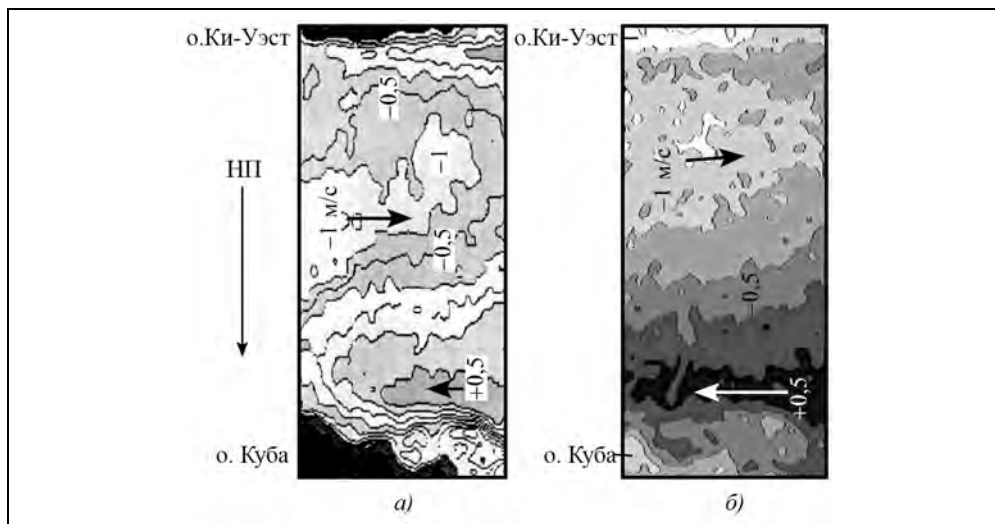
На рис. 9.14,а,б соответственно представлены контурные диаграммы радиальной составляющей скорости течения при обработке без коррекции и с коррекцией

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

амплитудной неравномерности. Топологии диаграмм близки, выявляется циркуляция течения по часовой стрелке: вправо у острова Ки-Уэст (в верхней части диаграммы), тангенциальные составляющие (радиальная скорость равна нулю) в правой части – вниз, а в левой – вверх, противоток течения (влево) – ближе к берегам Кубы и узкий рукав вдоль побережья Кубы – опять с направлением вправо.



**Рис. 9.13.** Радиолокационные изображения (а) и измеренные поля доплеровских частот при отсутствии коррекции амплитудных неравномерностей (б) и с применением коррекции (в) (Флоридский пролив, PCA ERS-2)



**Рис. 9.14.** Контурные диаграммы радиальной составляющей скорости течения:  
*a* – обработка, без коррекции амплитудной неравномерности [69\*];  
*б* – обработка с коррекцией неравномерности

Рассмотренная методика измерения доплеровской частоты, основанная на анализе получаемого РЛИ и выборочной корректировки радиоголограммы, позволяет снизить погрешности измерений в областях, примыкающих к суше, а также повысить точность калибровки измерений по участкам суши, съемка которых должна специально предусматриваться при изучении течений. Должны включаться также острова, где имеется максимальный градиент амплитуды отраженного сигнала. Возможно расширение методики с применением сегментации комплексного РЛИ по данным предварительного дешифрирования и проведение измерений по выделенным фрагментам КРЛИ с последующим преобразованием их во временную область.

#### **9.4.4. Экологический мониторинг морских акваторий**

Важнейшей задачей мониторинга водных объектов является определение общей загрязненности акваторий и учета ее составляющих. Основные направления экологического мониторинга морской среды включают в себя [93, 129, 144]:

- оперативное картирование параметров состояния и загрязнений водной среды, вызванными различными источниками: береговыми (терминалы, вынос речных вод, содержащих пленочные загрязнения смешанного антропогенного и естественного происхождения), морскими (платформы нефтепромыслов), судовыми (сброс вод, содержащих нефтепродукты), а также биогенными, связанными с повышенной биологической продуктивностью, в том числе с жизненными циклами хлорофилла и активным цветением водорослей;

- анализ метеорологической обстановки и ее влияния на распространение загрязнений;

- изучение закономерностей прибрежной циркуляции и их влияния на распространение загрязнений;

- выявление различных ситуаций распределения загрязнений в прибрежных водах.

Необходимо рассмотрение указанных явлений в тесной взаимосвязи, поскольку загрязнения, попадая в морскую среду, становятся частью этой среды и развиваются по тем же законам, по которым развивается и сама морская среда.

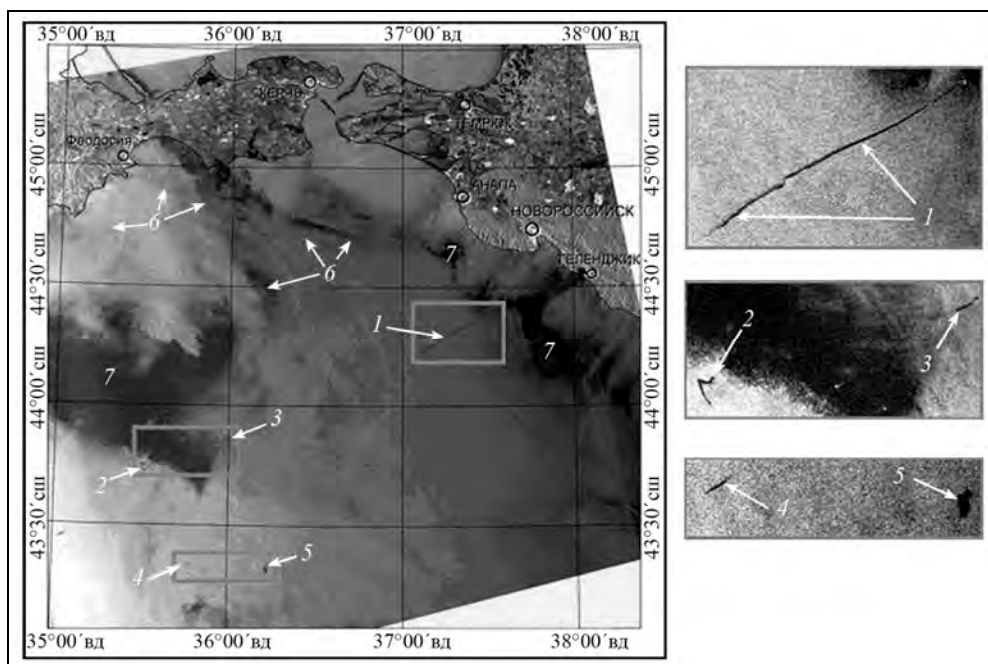
Основным средством спутникового контроля состояния морской поверхности и оценки степени загрязненности являются космические РСА со средним пространственным разрешением (30...75 м), обеспечивающие получение стабильных данных, не зависящих от времени суток и прозрачности атмосферы. В связи с однородностью диэлектрических свойств воды в микроволновом диапазоне вариации рассеянного сигнала связаны только с геометрическими параметрами возмущений, что облегчает интерпретацию снимков.

Особенность использования РСА состоит в том, что видимое на РЛИ выглаживание поверхностного волнения может быть вызвано как пленочными загрязнениями различной природы, так и другими причинами. К ним относятся резкое ослабление приповерхностного ветра, цветение водорослей с образованием плёнки на поверхности, поверхностные проявления различных атмосферных и океанических процессов и т.д. Поэтому для интерпретации радиолокационных данных необходимо привлекать различные сопутствующие измерения (ветер, течения, температура, содержание



биомассы и др.), а также широко использовать косвенные признаки, позволяющие конкретизировать происхождение того или иного пятна (форма, размеры, вид границы, текстура, близость возможных источников загрязнения и др.).

На рис. 9.15 приведены РЛИ разного типа поверхностно-активных пленок в Черном море, полученных в С-диапазоне волн с помощью PCA Envisat ASAR.



**Рис. 9.15.** Типы поверхностно-активных пленок, наблюдаемых с помощью РСА:

1 – 5 – пленки нефтяных загрязнений с судов, площади нефтяных загрязнений: 1 – 9,2 км<sup>2</sup>; 2 – 1,6 км<sup>2</sup>; 3 – 1,2 км<sup>2</sup>; 4 – 0,5 км<sup>2</sup>; 5 – 3,5 км<sup>2</sup>; 6 – пленки биогенных загрязнений вдоль линий тока поверхностных течений; 7 – области ветрового затишья (ИСЗ Envisat, ASAR, разрешение 75 м, ВВ [129])

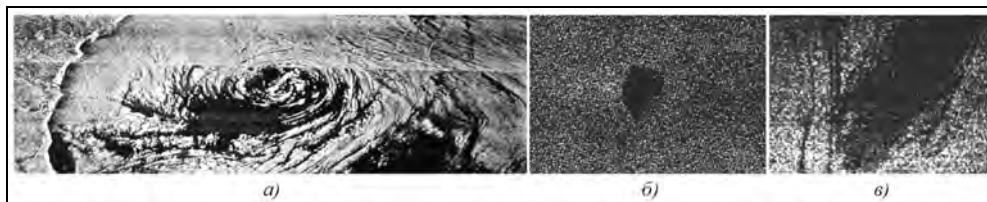
Другой ограничительный фактор радиолокационной съемки состоит в том, что пленочные загрязнения можно наблюдать в диапазоне скоростей ветра от 2 до 10 м/с. При слабом ветре мала мощность отраженного сигнала, и контрасты, вызванные выглаживанием ряби, не обнаруживаются. При более сильном ветре волнение усиливается настолько, что плёнка, покрывающая морскую поверхность, или быстро разрушается, или уже не в состоянии оказать сколько-нибудь заметное для радиолокатора воздействие на шероховатость поверхности.

В статье [144] отмечается, что подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности представляет собой утечки и сбросы с судов нефтепродуктов и содержащих их жидкостей в результате рутинных операций на судах: промывочные, балластные, а также льяльные (содержащие более 15 мг/л нефтепродуктов) воды из помещений грузовых отсеков. Как выяснилось, подобные незаконные сбросы настолько распространены, что в совокупности наносят гораздо больший ущерб экосистеме Черного моря, чем отдельные катастрофические разливы нефти.

Одним из главных характерных признаков, помогающих выявить нефтяное пятно на РЛИ, является его геометрическая форма. Она разная — в виде вытянутых темных линий (при сбросах с судов во время их движения) или в виде темного пятна округлой формы для неподвижных судов. Существенно влияние ветра на форму и структуру пятна — под непосредственным воздействием ветра нефть аккумулируется на подветренной стороне. Приповерхностный ветер возбуждает динамические процессы в верхнем слое воды, например вихри, трансформирующие геометрию пятна.

Биогенные пленки — результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом, фито- и зоопланктона, а также бактерий. Они сохраняются в море при слабых ветрах в течение продолжительного времени и начинают разрушаться, когда скорость ветра превышает 6...7 м/с. После прекращения действия сильного ветра органические вещества снова выносятся на поверхность и образуют слики. При интерпретации радиолокационных изображений главная трудность заключается в различении пятен нефтяных пленок и пленок от биогенных поверхностно-активных веществ на морской поверхности.

Данные радиолокационного зондирования нефтяных загрязнений можно получать с помощью космических РСА диапазонов волн  $X$ ,  $C$ ,  $S$ , а также миллиметрового диапазона. На рис. 9.16 приведены РЛИ морской поверхности, снятые в  $S$ -диапазоне волн. В  $L$ -диапазоне волн одночастотное зондирование менее информативно. Но оно в сочетании с использованием информации РСА другого диапазона волн позволяет получить грубую оценку толщины пленки.



**Рис. 9.16.** РЛИ морской поверхности, снятые в  $S$ -диапазоне волн:

$a$  — Мраморное море, август 1987 г., пленки биогенных загрязнений;  $b$  — нефтяное пятно, эксперимент в Атлантическом океане;  $c$  — размытое нефтяное пятно (РСА «Меч-К» КА «Космос-1870» ( $a$ ), РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1» ( $b$ ,  $c$ ), разрешение  $\sim 20$  м, ГГ)

Наибольший опыт интерпретации данных получен при зондировании в  $C$ -диапазоне волн по амплитудным РЛИ от РСА Radarsat-1 (ГГ-поляризация), ERS-1/2 (ВВ-поляризация), Envisat (ВВ- или ГГ-поляризации). Анализ снимков перекрестных поляризаций затруднен из-за низкого отражения сигналов от поверхности пятен. Используемые радиолокационные данные позволяют определить геометрию и текстуру пятен, но не дают оценки толщины слоя загрязнения. Эта задача является предметом исследований, включая анализ комплексных ГГ+ВВ изображений, получаемых в разных диапазонах волн.

Сложность идентификации типа пленок и различения природных образований от антропогенных пленочных загрязнений моря, поступающих с судов, объектов ТЭК, рек, промышленных производств, требует привлечения дополнительной ин-

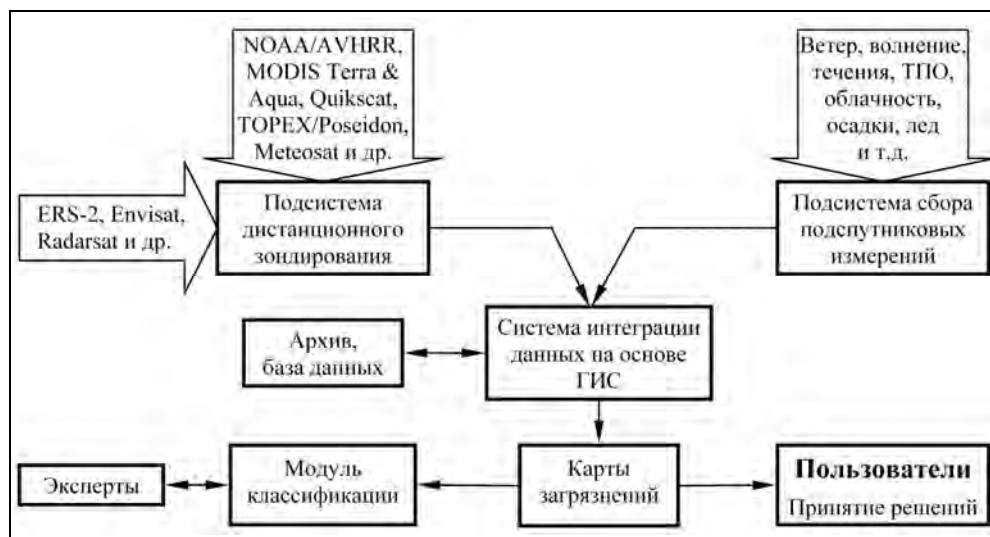
формации, которая может быть получена от географической информационной системы (ГИС) [93]. В рамках ГИС должны создаваться банки РЛИ нефтяных загрязнений моря.

*Нефтяные разливы на РЛИ характеризуются [470, 540]:*

- формой (нефтяные загрязнения характеризуются простой геометрической формы);
- краями (гладкая граница с большим градиентом, чем у сликов природного происхождения);
- размером (слишком большие пятна обыкновенно являются сликами естественного происхождения, например, скоплениями водорослей или планктона);
- географическим расположением (нефтяные разливы в районах нефтедобычи или путей транспортировки нефтепродуктов).

Для распознавания типа пленок используют нейросетевые алгоритмы со следующим набором информационных признаков [293]: площадь  $A$ , периметр  $P$ , сложность образа  $C = P/2\sqrt{\pi A}$ , коэффициент формы  $S$  для пикселей, принадлежащих пятну [359], СКО яркостей в пятне и окружающем фоне, средний и максимальный контрасты яркостей пятна к средней яркости фона, градиент границы пятна, СКО градиента.

Для повышения надежности идентификации радиолокационные данные дополняют мультиспектральными данными, информацией о положении населенных пунктов, промышленных объектов, инфраструктуры топливно-энергетического комплекса – ТЭК (месторождений нефти и газа, газонефтепроводов, буровых вышек и платформ, нефтяных терминалов, портов и т.п.), судоходных трасс путем их интеграции в ГИС. Примерный вид системы экологического мониторинга в структуре ГИС приведен на рис. 9.17.



**Рис. 9.17.** Система экологического мониторинга моря в структуре ГИС [93]

В работе [93] предложен состав системы мониторинга моря из четырех основных блоков.

1. *Подсистема дистанционного зондирования*, обеспечивающая сбор, обработку и анализ как РЛИ, так и других данных дистанционного зондирования: температуры поверхности моря (ИСЗ NOAA/AVHRR), цвета моря и облачного покрова (ИСЗ Terra и Aqua), ветра (ИСЗ Quikscat), осадков (SSV/I и TMI), высоты волн (ИСЗ Torex-Poseidon).

2. *Подсистема сбора спутниковых измерений*, которая отвечает за сбор подспутниковых измерений, данных и сопутствующей информации о морской среде (ветер, течения, состояние моря и т.п.), о характере нефти и параметрах нефтяных разливов. Собранные данные могут дальше использоваться как начальные в моделях дрейфа нефтяных пятен.

3. *Система интеграции данных*. Ее основа – ГИС, которая вместе с модулем Классификации осуществляет интеграцию всех других данных и создание конечного продукта для пользователей – карт распределения нефтяных загрязнений.

4. *Подсистемы архивирования и хранения данных*, обеспечивающая сохранность информации, необходимой для моделирования прогнозных сценариев и получения статистических сведений о нефтяных загрязнениях.

Привлечение региональных информационных и управляющих служб ГИС к экологическому контролю моря и прибрежных территорий оправдано отмеченным выше обстоятельством необходимости быстрого реагирования на обнаруженные очаги загрязнения с привязкой их к движущимся источникам. Должны использоваться координатная информация от систем опознавания, привлекаться морские средства контроля для взятия проб нефтепродуктов. По результатам анализа должны приниматься организационные меры для устранения ущерба и предотвращения загрязнений.

#### **9.4.5. Исследования проявлений внутренних волн для выявления топографии дна**

В настоящее время практически освоена технология составления топографических карт рельефа дна по результатам космического радиолокационного зондирования морской поверхности. Реализуемая точность сравнима с точностью промера с помощью эхолотов [92]. Для определения глубин применяют модели РЛИ, параметрами которых являются опорные глубины, скорости течения и характеристики волнения на момент съемки. По существу решается вариационная обратная задача моделирования амплитудного радиолокационного изображения по взаимодействию рельефа дна с морским течением, которая позволяет инвертировать изменения интенсивности РЛИ в локальные вариации глубины относительно известных опорных значений глубин. По экспериментальным данным, собранным в Северном море, установлено, что наиболее благоприятными метеорологическими условиями для топографических измерений являются скорость течения 0,4...0,8 м/с, скорости ветра 3...10 м/с.

Как отмечается в [92], бельгийская фирма ARGOSS разработала новую технологию мониторинга рельефа морского дна BAS (Bathymetry Assessment System). Она включает в себя пакет компьютерных моделей для расчета глубин по данным радиолокационного зондирования. Эти модели учитывают, что формирование РЛИ донной топографии происходит вследствие трех процессов, протекающих в слое

воды от поверхности до дна. Взаимодействие между приливным потоком и рельефом дна вызывает модуляцию поверхностного потока, она приводит к вариациям спектра поверхностных волн, а значит изменяется коэффициент отражения радиоволн. При моделировании используют уравнения, описывающие эти три процесса.

Для обеспечения строительства портов фирма ARGOSS создала службу, которая составляет карты глубин, течений, уровня моря, а также концентрации взвесей. Кроме РСА (ERS-2) используют информацию от датчиков SeaWiFSs, оптоэлектронного сканера MOS и радиовысотомера КА Topex/Poseidon.

В России обрабатываются методики решения этой задачи картографирования топографии дна с использованием архивных данных от РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1».

#### **9.4.6. Обнаружение опасных волновых явлений и их предвестников**

К опасным волновым явлениям в Мировом океане относятся штормовые волны с экстремально высоким уровнем (до 12 м – «волны-убийцы») и опасные волны зыби, а также волны цунами. Для их наблюдения имеют перспективы бистатическое зондирование морской поверхности в режиме квазизеркального отражения в сочетании с методами интерферометрии [181\*, 182, 183\*].

Режим квазизеркального отражения позволяет совместить преимущества радиоальтиметра (высокий энергетический потенциал) с преимуществами космических РСА (широкая зона бокового и скошенного обзоров). Использование фазометрических методов позволяет формировать не только яркостные изображения (воспроизводящие высоту энергонесущих волн), но и изображения поля уровня (усредненные высоты морской поверхности), характеризующее поле сейсмических (быстрых гравитационных) волн.

Возможны два варианта реализации бистатического режима:

1) использование пар низкоорбитальных (~800 км) спутников, один из которых – активный, передающий, а второй – пассивный с двумя антеннами и приемными каналами (интерферометрия поперек трассы КА);

2) использование подсвета с геостационарного КА и набора низкоорбитальных (~800 км) КА с пассивными интерферометрическими приемниками (или тандемами приемных КА).

Такие конфигурации могут быть использованы для наблюдения морского волнения и получения скоростных портретов, а также для обнаружения подъема уровня морской поверхности на 2,5...5 см и более (на площади, превышающей 100×100 км), который является порождением волны цунами. Разрешающая способность бистатической РСА с учетом некогерентного накопления в элементе разрешения должна быть не хуже 1 км. Полоса съемки должна быть не менее 1000 км при периодичности получения информации не более 1,5...2 ч.

При бистатическом зондировании разрешающая способность поперек трассы КА в районе зеркальной точки резко падает (см. подраздел 3.3.4). Но в случае использования широкополосного сигнала (200...300 МГц) можно реализовать приемлемое для наблюдения морской поверхности пространственное разрешение (~30 м поперек трассы КА), как и у моностатических РСА. Для обнаружения волн цунами используется интерферометрическая обработка с усреднением отсчетов высоты по площади пятна 1 км<sup>2</sup> с числом отсчетов  $N \geq 30000$ .

Реализации такой информационной системы раннего предупреждения об опасных волновых явлениях должен предшествовать натурный эксперимент. Для его проведения в первой конфигурации может использоваться орбитальная группировка из трех КА с РСА – передающей и приемного тандема. В результате эксперимента должны быть отработаны алгоритмы измерения мезомасштабного рельефа морской поверхности, обнаружения возмущений, оценены ожидаемые характеристики космической системы, оптимизированы режимы обзора и параметры аппаратуры.

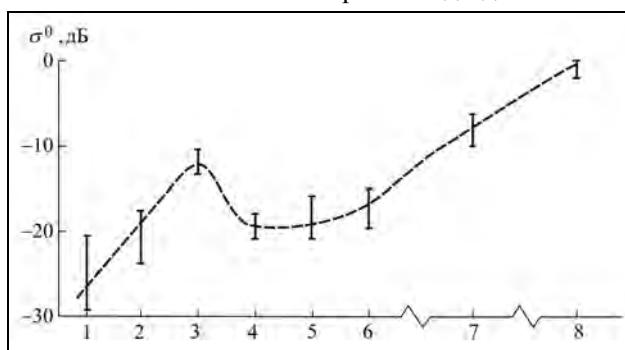
### 9.5. Исследование ледового покрова

В задачи, решаемые средствами радиолокационного зондирования ледового покрова, входят [197]:

- 1) оценка ледовой обстановки и прогноз ее изменений, выработка рекомендаций по проводке судов и районам ловли рыбы;
- 2) измерение скорости дрейфа льда;
- 3) применение радиофизических методов для изучения климата и взаимодействия океан – атмосфера в прикромочных зонах с типичным для них большим градиентом параметров гидрометеорологических процессов;
- 4) оценка объема водозапаса в ледниках и материковых льдах;
- 5) выявление подвижки ледников;
- 6) контроль таянья материкового льда.

Многолетние экспериментальные исследования ледовых покровов с использованием самолетных и космических радиолокационных средств низкого разрешения (1...2 км) – скаттерометров и космических РБО на ИСЗ «Космос-1500, -1602, -1766», «Океан», работавших в X-диапазоне волн, выявили зависимости между общим характером ледового покрова и значением УЭПР. Обобщенная по экспериментальным и расчетным данным зависимость  $\sigma^0$  от возраста льда для  $\lambda=3$  см и

вертикальной поляризации приведена на рис. 9.18. Как видно, по значению  $\sigma^0$  не всегда возможна однозначная интерпретации РЛ-информации о ледовом покрове. Значительные трудности возникают при определении возрастных градаций однолетних льдов, причем контрасты морских льдов на фоне открытой воды могут принимать в зависимости от шероховатости льда и скорости приводного ветра как положительные, так и отрицательные значения.

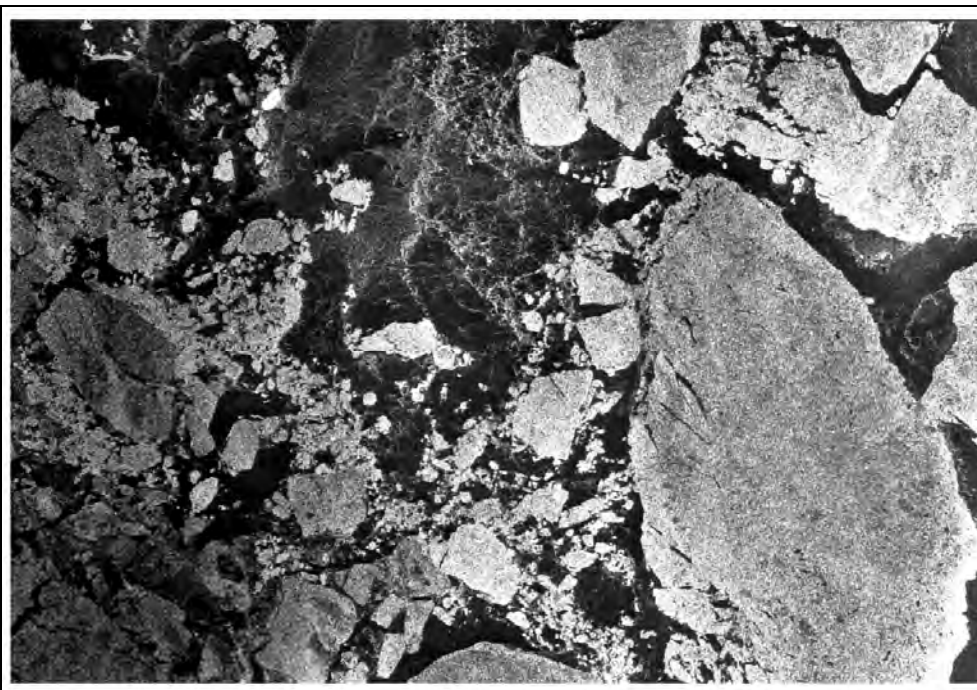


**Рис. 9.18.** Обобщенная зависимость УЭПР различных типов льда по данным измерений в X-диапазоне волн (ВВ) при угле падения  $40^\circ$  [197]:  
1 – море, скорость ветра 0–10 м/с; 2 – нилас (5–10); 3– серый, серобелый (10–30); 4 – тонкий однолетний (30–70); 5 – средний однолетний (70–120); 6 – толстый однолетний (>120); 7 – многолетний (>200); 8 – шельфовые ледники (в скобках указана толщина льда, см)

### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

Более точная идентификация (торосы, многолетний лед) может быть получена путем двухчастотного зондирования, например, в  $X$ - и  $L$ -диапазонах волн, но применительно к задаче обеспечения судовождения требуется существенное улучшение разрешающей способности радиолокатора, чтобы перейти от общих характеристик ледового покрова с оценкой возможности прохождения каравана судов с ледоколом до оценки сплоченности льда и прокладки наиболее экономной трассы.

На рис. 9.19 приведены РЛИ ледовой обстановки в Антарктике, снятые в  $S$ -диапазоне волн с помощью РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1». Видна резкая изменчивость текстуры ледовых образований, которая может использоваться для их идентификации.



**Рис. 9.19.** РЛИ ледовых полей в районе Антарктиды  
(РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1», разрешение 15 м, ГГ)

В материалах, посвященных исследованиям информативности радиолокационного зондирования в разных частотных диапазонах (включая совместные эксперименты с РСА «Меч-КУ» и SIR-C/X-SAR), на основе которых была сформулирована концепция построения РСА LightSAR, показано, что поляриметрический РСА  $L$ -диапазона волн позволяет однозначно определять требуемые характеристики ледового покрова при поляриметрическом зондировании в режиме Скансар с разрешением  $100 \times 100$  м [446, 474].

Для анализа динамики поведения ледовых полей эффективно использование методов дифференциальной интерферометрии по серии КРЛИ, периодически по-

лучаемых на повторных орбитах. Применение метода прецизионного масштабирования комплексных сигналов, рассмотренного в подразделе 6.5.1, для интерпретации дифракционных картин ледовых полей позволило обнаружить и оценить их сжатие [162\*].

Задача определения баланса ледовой массы материковых льдов решается путем измерения вертикальных и горизонтальных смещений ледника, что реализуется поперечной интерферометрией. Изменения скорости движения может провоцировать динамические неустойчивости, вызванные эффектом смазки от водного слоя. С целью устранения ошибок измерений скорости из-за рельефа применяют метод четырехпроходной интерферометрии, вычисляя рельеф по одной из пар и компенсируя его в интерферограмме. Для проведения съемок эффективно использовались тандемы ERS-1, ERS-2 [478].

В дополнение к приведенным выше рассмотрим задачу обнаружения плавающих айсбергов и возможностей их отличия от судов по получаемым РЛИ. Актуальность этой задачи заключается в том, что айсберги и их осколки встречаются в арктических морях в 59 % случаев [142]. Размер типичного айсберга («Bertha») составляет по длине 150 м и имеет высоту 35 м. Осколки айсбергов, даже не превышающие 20 м по длине (ширине) и высоте 5 м (как у маломерных судов), имеют объем льда до 10000 тонн, что представляет серьезную угрозу мореходству в арктических широтах.

Основными классификационными признаками айсбергов являются их низкие значения ЭПР и УЭПР по сравнению с судами. Так, например, при угле падения  $51^\circ$  расчетная ЭПР для осколка айсберга размером 14 м и высотой 3 м составляет от  $\sigma=6...25 \text{ м}^2$  (СКО  $6...20 \text{ м}^2$ ). В зависимости от ракурса наблюдения это соответствует УЭПР  $\sigma^0=0,03...0,125$ . Морские суда с аналогичными размерами надводной части (катер) имеют  $\sigma=100...1000 \text{ м}^2$  и  $\sigma^0=0,6...1,7$ . Очевидно, что по полученным двумерным радиолокационным портретам судна и осколков айсбергов их различение не составляет технических трудностей при достаточных пространственном разрешении и чувствительности РСА. Заметим, что даже при минимальном значении УЭПР айсберга отметки от него имеют достаточный контраст на фоне отражения от морской поверхности с  $\sigma^0 \sim 0,003$ . В [142] сделан вывод, что выбор длины волны РСА из сантиметрового или дециметрового диапазонов, равно как и сила морского волнения, не играют заметной роли.

## **9.6. Зондирование суши и растительного покрова**

### **9.6.1. Тематическое картирование объектов суши**

Разнообразие задач дистанционного зондирования суши требует дифференцированного подхода к выбору (заказу) вида радиолокационного продукта и алгоритмов тематической обработки. Как уже отмечалось, концепция проведения радиолокационной съемки поверхности Земли предусматривает полное использование ресурсов КА по энергопотреблению и пропускной способности радиолинии передачи данных. При планировании съемок учитывают заявки потребителей, а оставшийся резерв используют для создания архива РЛИ. Для задач, не требующих оперативных данных



(картография, геологические изыскания, землеустройство, составление земельного кадастра и т.п.), возможно использование архивных материалов ДЗЗ.

**Топографическое картирование (построение цифровых карт рельефа).** Для этого вида зондирования достаточно съемки с одной поляризацией с получением пар КРЛИ в интерферометрическом режиме с «жесткой» или «мягкой» базой (тандемы или межвитковая интерферометрия). Разрешающая способность КРЛИ определяется масштабом и точностью создаваемых карт. Методы обработки КРЛИ рассмотрены в подразделе 9.7.1.

**Геологическое картирование.** Для геологического картирования (археологии, исследования вулканической деятельности) желательное применение поляриметрической съемки преимущественно в дециметровых  $S$ - или  $L$ -диапазонах волн, а в перспективе – двухчастотного зондирования с добавлением  $P$ -диапазона волн [87]. Возможности выделения подповерхностных структур возрастают при проведении съемок с разными углами падения и ракурсами, применением правостороннего и левостороннего обзоров на восходящем и нисходящем витках. Алгоритмы обработки информации аналогичны приведенным в статьях [360\*, 374\*].

**Хозяйственная деятельность.** Ее обеспечение на региональном уровне (строительные и изыскательские работы, землепользование) требует постоянного обновления крупномасштабных картографических материалов. Преимущество радиолокационного зондирования – получение стабильных, повторяемых материалов, позволяющих применить эффективные алгоритмы выявления изменений в окружающей обстановке и автоматизировать процесс обновления карт. Для большинства таких задач применимы рассмотренные в подразделе 9.6.3 робастные некогерентные методы выявления изменений (Change detection), основанные на корреляционной обработке пар РЛИ, снятых в разное время. В отличие от дифференциальной интерферометрии некогерентные методы не требуют повторяемости условий наблюдения для совпадения фазы.

**Мониторинг антропогенных объектов.** Новые методы этого вида мониторинга на основе радиолокационной съемки (городов, населенных пунктов, дорожной сети, различных инженерных сооружений, линий электропередач, инфраструктуры ТЭК и т.п.) позволяют вести контроль нарушений геометрии зданий от просадки почвы (вызванной природными явлениями или горнодобывающей деятельностью), а также от действия разрушительных факторов. Используя методы дифференциальной интерферометрии для КРЛИ с повторяющихся орбит, составляют карты городов с фиксацией изменений геометрии зданий за период в несколько лет. Регистрируемые скорости уходов около 2 см/год. При обработке данных используется 3D триангуляция [260].

Таковую же технологию применяют при мониторинге железнодорожных путей в горных районах, подверженных осыпям и лавинам [224], и контроле состояния газопроводов. Обнаруживаются процессы проседания линий газопроводов на миллиметры в день из-за возможного таяния грунта под трубами. Отсутствие какой-либо динамики за зимний период является следствием промерзания почвы и стабилизации поверхности. Отмечено, что переход из  $S$ -диапазона в более длинноволновый диапазон, например, в  $L$ , может резко снизить проблему временной декорреляции КРЛИ [83–86].

**Индикация движущихся наземных целей.** Эта самостоятельная задача — решается методами продольной интерферометрии в РСА с секционными АФАР, применением тандемов РСА. Новые технологии предусматривают использование антенны с переключаемой ДНА, многоканальное построение РСА [277], а также реализацию рассмотренного в подразделе 4.2.4 метода пространственно-частотной фильтрации [37\*, 428\*].

**Военная разведка.** Основным инструментом при дешифрировании радиолокационных данных в задачах военной разведки являются некогерентные и когерентные методы выявления изменений оперативной обстановки в районах наблюдения. В ходе регулярных наблюдений театра военных действий формируют архив КРЛИ стационарных объектов с вариацией углов падения и ракурсов, что позволяет автоматизировать задачу обнаружения изменений обстановки и сократить время дешифрирования [67, 68]. Дифференциальную интерферометрию сочетают с робастными некогерентными методами выявления изменений, рассмотренными в подразделе 9.6.3.

**Мониторинг чрезвычайных ситуаций.** Рассмотренные выше методы эффективны при мониторинге чрезвычайных ситуаций, в том числе для сопровождения поисково-спасательных работ. Как показывает опыт радиолокационного зондирования, нужна четкая каталогизация отражающих объектов на территории страны, чтобы выявить на их фоне вновь появившиеся отметки – следы катастроф.

### **9.6.2. Мониторинг растительного покрова**

Задача радиолокационного зондирования растительного покрова в современных условиях – получение количественной информации об объеме биомассы, степени созревания культур в целях прогноза урожаев, выявления заболеваний, контроля применения агротехнологий или оценки динамики рубочных работ для лесных массивов. Актуальной задачей является также точная типизация растительности, например для выявления посевов наркотических растений. Для решения этих задач используются поляризационные и спектральные различия в отражении от подстилающей поверхности, выявляемые при комплексном дешифрировании данных.

В широком спектре частот радиолокационного зондирования из космоса параметры сигнала, отраженного от растительного покрова, имеют большие вариации, которые обусловлены резкой частотной зависимостью отражающих и поглощающих свойств зеленой массы, различием геометрии растений (включая резонансные явления), особенностями отражения от древесной массы и почвы. Общие методы тематической обработки в задачах сельскохозяйственного мониторинга и мониторинга лесопокрытых территорий близки, хотя решаемые задачи несколько отличаются.

В задачи *сельскохозяйственного мониторинга входят:*

учет использования продуктивных земель для регионального управления ресурсами;

прогноз урожая, в том числе в глобальном масштабе, с целью экономической разведки для установления цен на сельхозпродукты;

мониторинг сельхозугодий и контроль состояния посевов;

контроль эффективности агротехнологий, особенно для районов с резкой изменчивостью химического состава и влажности почвы, требующих проведения избирательных мероприятий;

обнаружение зон поражения вредителями — насекомыми или грызунами;

оценка динамики плодородия почв, засоления, опустынивания.

В задачи *дистанционного зондирования лесопокрываемых территорий* входят [9]:

оценка общего состояния лесных массивов, объема деловой древесины;

уточнение границ кварталов и выделов, их площадей, создание автоматизированной системы непрерывной лесотаксации, кадастровой оценки;

контроль эффективности мероприятий по качественному состоянию лесов и непрерывности их использования, лесовосстановления, контроль проведения рубок, ухода, санитарных рубок, оценка текущего среднего прироста древесины;

определение и оконтуривание территорий вспышек вредителей и болезней леса, оперативной оценки ущерба от таких явлений;

оконтуривание территорий произрастания особо ценных пород;

оценка характеристик жизнедеятельности лесных экосистем в их многообразии;

прогнозирование чрезвычайных ситуаций (оконтуривание территорий с повышенной пожароопасностью, территорий будущего паводка), ускорения их ликвидации (координатная привязка очагов горения в условиях сильной задымленности), выявления ущерба от нарушения режима хозяйствования (несанкционированные рубки, перерубы), оценка ущерба от природных катаклизмов (ветролом, ветровал, снеголом).

Применительно к сельскому хозяйству требуется по материалам дистанционного зондирования определять вид культуры, стадию вегетации, объем фитомассы. Наиболее эффективным является регулярное (более шести раз в год [75, 456]) поляриметрическое (две поляризации) радиолокационное зондирование в сочетании с использованием информации от оптических и ИК-датчиков (MERIS, MODIS).

Спектроанализатор MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) с разрешением 300 м и полосой съемки 1000 км входит в состав полезной нагрузки КА Envisat, сканер MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с разрешением 250 м установлен на спутниках Terra и Aqua. Использование информации от оптических и ИК-датчиков позволяет получить приближенную оценку распределения запасов фитомассы в сообществах на основании расчета и сравнения значений нормализованного вегетационного индекса NDVI (Normalized difference vegetation index):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (9.19)$$

где NIR – значение отражения в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра [26, 273].

Основной опыт практического применения космической радиолокационной съемки основан на использовании амплитудных РЛИ, полученных в С-диапазоне волн от ERS-1/2, Radarsat-1, Envisat (две поляризации).

Информативными признаками для идентификации вида сельскохозяйственных культур и прогноза урожая являются значения УЭПР и определяемая агротех-

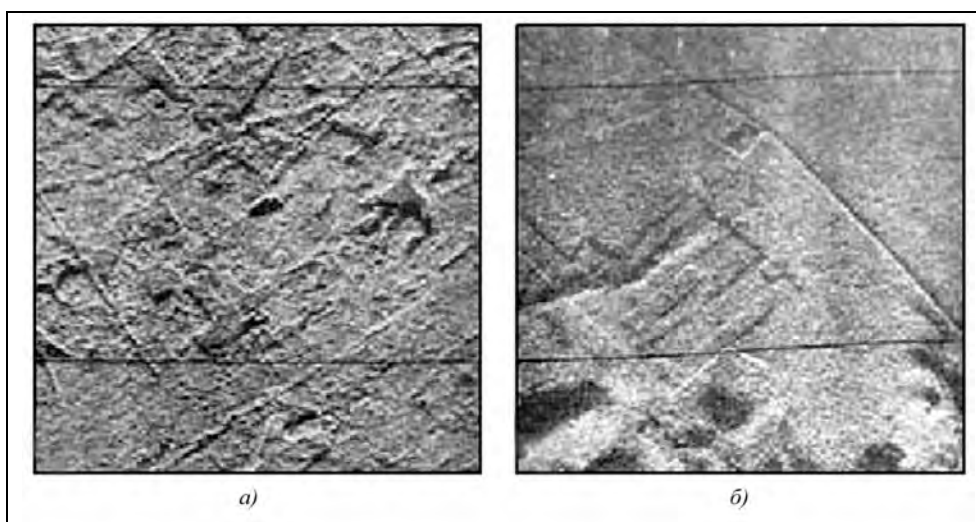
нологиями текстура полей в сочетании с их временной зависимостью от вегетационных фаз [7, 26]. Играет важную роль учет характерологических особенностей климатических районов (среднесуточная температура, параметры шероховатости поверхности, проективное покрытие, объем, структурные характеристики, влагосодержание биомассы) с оптимальным выбором интервала времени для съемки. Так, например, для большинства сельскохозяйственных культур восточных областей Украины оптимальные условия съемки достигаются в среднем во второй декаде июня. Методики расчета времени съемки и прогнозирования урожая приведены в [7].

Для сегментации и оконтуривания полей с однородной статистикой используют линейные элементы (лесополосы, межи, дороги), выделяемые на РЛИ. Линейные элементы иного вида характерны для вспашки. Как правило, однородная диффузная структура типична для полей со сплошным проективным покрытием (бобовые, подсолнечник), а для злаковых культур видны вызванные вспашкой структурные неоднородности, которые не маскируются фитоэлементами. Незлаковые структуры достоверно распадаются на классы по совокупности текстурных признаков

$$v = \frac{\mu_1^2}{\mu_2} \text{ и } \chi = \frac{\mu}{\sigma}, \quad (9.20)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $\mu$  – моменты гистограммы энергетического РЛИ.

Параметры амплитудных распределений УЭПР лиственных и хвойных лесов существенно различаются. Так, текстура РЛИ сосняков гораздо более диффузна, чем текстура РЛИ дубрав (рис. 9.20). Это связано с различием в строении основных элементов, формирующих радиолокационный отклик – листовой пластины и охвоенной ветви, а также инфраструктуры древостоя в целом. Текстурные признаки на РЛИ (9.20) позволяют надежно различать не только породный состав лесонасаждения, но и его состояние [8].



**Рис. 9.20.** РЛИ древостоев: *а* – дубравы; *б* – сосняки [8]

По основному параметру – значению УЭПР задача оценки биофизических параметров почвы может решаться путем обращения физических радиационных моделей, устанавливающих связь УЭПР с параметрами почвы и растительного покрова. Радиационная модель для активной радиолокации имеет вид [147]

$$\sigma^0 = \sigma_p^0 + \sigma_s^0 + \sigma_{sp}^0, \quad (9.21)$$

где  $\sigma_p^0$  – рассеяние волн почвой, ослабленное растительностью;  $\sigma_s^0$  – рассеяние растительным слоем;  $\sigma_{sp}^0$  – перерассеяние волн между почвой и растительностью.

Выражая эти составляющие через параметры среды – температуру, влажность, удельную фитомассу, а также параметры РСА – длину волны, поляризацию, угол падения, вычисляем значения  $\sigma^0$  и сравниваем с измеренным. Решение обратной задачи возможно методами регрессионного анализа, альтернативой которому служат нейросетевые алгоритмы на основе многослойных нейронных сетей (персептронов) или радиально симметричных функций [147]. Преимущество таких алгоритмов обусловлено свойством обучения сетей на моделях и реальных данных и меньшие вычислительные затраты.

Выбор метода зондирования и вида исходных данных радарной съемки (РЛИ, КРЛИ, поляриметрические и/или интерферометрические комплекты данных) определяется сложностью конкретных задач мониторинга растительного покрова. В частности, высокой информативностью обладает разность фаз  $\Delta\varphi$  между поляриметрическими каналами, особенно для пар с согласованными поляризациями ВВ и ГГ [203].

Она может быть использована для описания трех доминирующих механизмов рассеяния:

- 1) поверхностного рассеяния (нечетное рассеяние) с  $\Delta\varphi \approx 0^\circ$  для относительно гладких поверхностей (поверхность водоемов, голая почва), когда ЭМ-волна испытывает одно отражение с типичным значением  $\Delta\varphi \approx 0^\circ$  и малым значением СКО. Это показывает, что ГГ- и ВВ-поляризованные волны находятся в фазе;
- 2) рассеяния с двойным переотражением (четное рассеяние) с  $\Delta\varphi$ , обычно равным  $\pm 180^\circ$  (урбанизированные области);
- 3) объемного рассеяния, где  $\Delta\varphi$  меняется от минус  $180^\circ$  до  $0^\circ$  (диффузное рассеяние – растительность).

На рис. 9.21 приведены гистограммы разности фаз для поля, леса и городской застройки. Аналогичные зависимости имеют гистограммы фазы для вырубki (СКО  $\sim 30^\circ$ ) и 46-летнего леса (СКО  $\sim 120^\circ$ , максимум  $\Delta\varphi \sim 60^\circ$ ).

Аналогичные методы радарной съемки могут применяться для исследования тундровых экосистем, анализа геометрических свойств земной поверхности (микро- и нанорельеф), построения цифровых карт рельефа, анализа распределения показателей, зависящих от диэлектрической постоянной: влажности почв, содержания солей, гранулометрического состава, глубины оттаивания сезонно-талого слоя мерзлоты, а также оценки запаса надземной фитомассы и границ растительных сообществ.

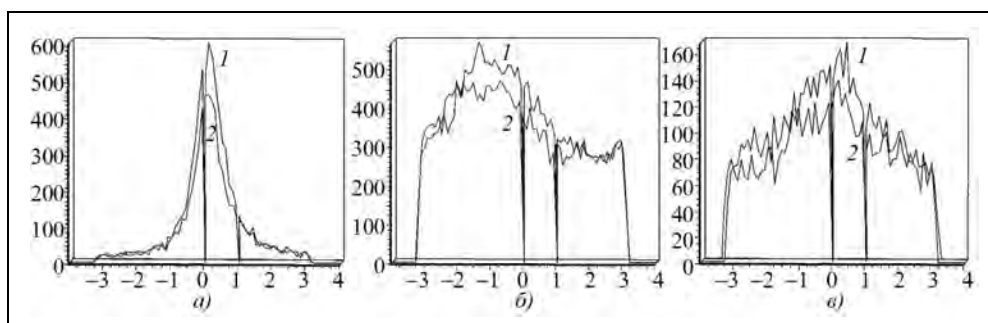


Рис. 9.21. Гистограммы разности фаз (в радианах) согласованных поляризаций для объектов: *а* – поле; *б* – лес; *в* – город; 1 – без фильтрации, 2 – после фильтрации с помощью фильтра Lee [203]

Обработка РЛИ предусматривает фильтрацию спекл-шума, сравнение разновременных и поляриметрических снимков (RGB-композиции), применение стандартных процедур сегментации и классификации, анализ гистограмм УЭПР. Для валидации данных радиолокационной съемки используют подспутниковые полигоны [10].

### 9.6.3. Некогерентные методы выявления изменений в оперативной обстановке

Возможности дифференциальной интерферометрии для выявления изменений в оперативной обстановке на местности ограничены жесткими требованиями идентичности условий наблюдения, при которых сохраняется когерентность пар КРЛИ стационарных объектов. В другой ситуации прибегают к некогерентному сравнению полученных энергетических или амплитудных РЛИ. Основными деструктивными факторами являются спекл-шум и недостаточное отношение сигнал/шум на РЛИ, что требует применения фильтрации РЛИ как первого шага обработки. Вызванные этим потери пространственного разрешения приводят к увеличению размеров обнаруживаемого группового объекта, что частично может быть скомпенсировано увеличением длины синтезированной апертуры при съемке в прожекторном режиме.

Основная идея алгоритма выделения изменений на РЛИ базируется на предположении, что при повторной съемке одного и того же участка местности с одного и того же ракурса изображения стационарных объектов на обоих РЛИ тождественны [68, 465]. Различия возникают только в местах, где на изображениях появляются новые объекты или исчезают объекты, ранее на них присутствовавшие. Предполагается, что целевые объекты (одиночные или групповые) должны создавать хорошо наблюдаемые отметки на РЛИ. Как правило, подобным образом производится обнаружение объектов техники – автомобильной, железнодорожной или авиационной.

Обнаружение перемещающихся объектов на фоне местности возможно с использованием стандартных методов обнаружения целей по величине локального контраста. Однако возникающий при этом уровень ложных тревог, создаваемый стационарными объектами небольших размеров, оказывается весьма высоким, что существенно снижает эффективность применения общепринятых методов.

Алгоритм выделения изменений на РЛИ включает в себя следующие основные этапы [68]:

- 1) выбор совпадающих кадров РЛИ одного диапазона волн и с близкими ракурсами наблюдения;
- 2) сравнение геометрического положения и определение локальных смещений соответственных фрагментов РЛИ;
- 3) фильтрация сформированного поля локальных смещений;
- 4) наложение совпадающих областей двух кадров друг на друга с компенсацией локальных смещений фрагментов;
- 5) вычисление взаимной корреляционной функции с соответствующим фрагментом другого кадра РЛИ. При этом выполняют пространственное совмещение РЛИ;
- 6) построение функционала амплитудного рассогласования кадров РЛИ.

В результате взаимной корреляции фрагментов по максимуму значения корреляционной функции  $R_c(m,n)$  определяется положение наилучшего совпадения для каждого фрагмента. Данная операция позволяет устранить влияние остаточных неучтенных геометрических искажений, присутствующих на обоих кадрах РЛИ. В космических РСА (в отличие от самолетных) со стабильной траекторией движения остаточные геометрические искажения невелики, что облегчает попиксельное совмещение РЛИ.

Функционал рассогласования вычисляют через отношение амплитуд РЛИ  $A$  и  $B$  по алгоритму:

$$B/A = 1 \text{ – изменения на РЛИ отсутствуют;} \quad (9.22)$$

$$B/A > 1 \text{ – на изображении } B \text{ появился новый отражающий объект;}$$

$$B/A < 1 \text{ – на изображении } B \text{ исчез отражающий объект,}$$

ранее присутствовавший на изображении  $A$ ;

$$D_{AB} = B/A; \quad B/A > 1 \text{ – признак наличия изменений.}$$

Признак наличия изменений

$$D_{AB} = B/A \quad \text{при } B/A > 1; \quad (9.23)$$

$$D_{AB} = A/B \quad \text{при } B/A < 1.$$

На рис. 9.22 приведен пример работы классификатора изменений обстановки.

Представленный выше алгоритм обнаружения различий на РЛИ позволяет значительно снизить уровень ложных тревог от стационарных объектов со стабильным отражением. На практике приходится применять фильтрацию для снижения шумов и спекл-шума, что сопровождается ухудшением пространственного разрешения.

Перспективным представляется итерационный метод с переходом от загрубленных РЛИ (фильтрация на матрице  $7 \times 7$  или  $5 \times 5$ ) к более детальным. Далее к объектам, отметки от которых превысили пороговый уровень, применяют аналогичные рассмотренным в подразделе 9.6.3 алгоритмы классификации, обладающие возможностью адаптации банка эталонов к параметрам анализируемых РЛИ.

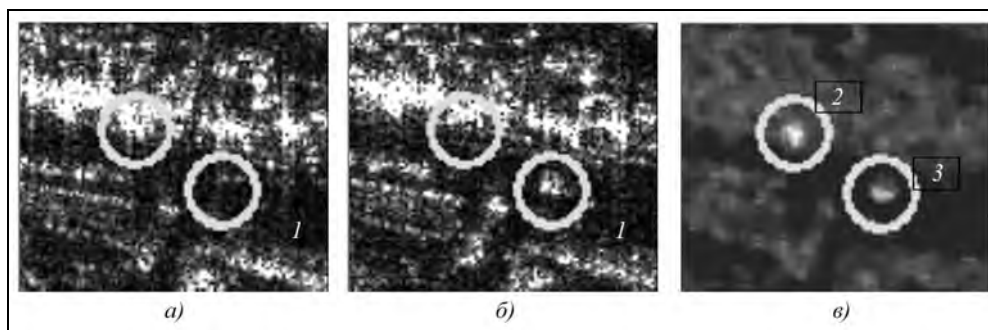


Рис. 9.22. Пример обнаружения объектов, идентифицируемых как объекты автомобильной техники:

*a* – мастер РЛИ *A*; *б* – вторичное РЛИ *B*; *в* – признак наличия изменений; *1* – стационарные объекты; *2* – объект, имевшийся только на РЛИ *A*; *3* – объект, появившийся на РЛИ *B* (РСА «Компакт», X-диапазон, исходное разрешение 1,35 м [68])

#### 9.6.4. Построение цифровых карт рельефа по радиолокационным стереоснимкам

В случаях, когда размеры интерферометрической базы пары снимков существенно превышают допустимую величину для сохранения когерентности между обоими КРЛИ, возможно построение карт рельефа методом стереометрической обработки амплитудных снимков [535]. Для реализации этого метода нужно, чтобы разность

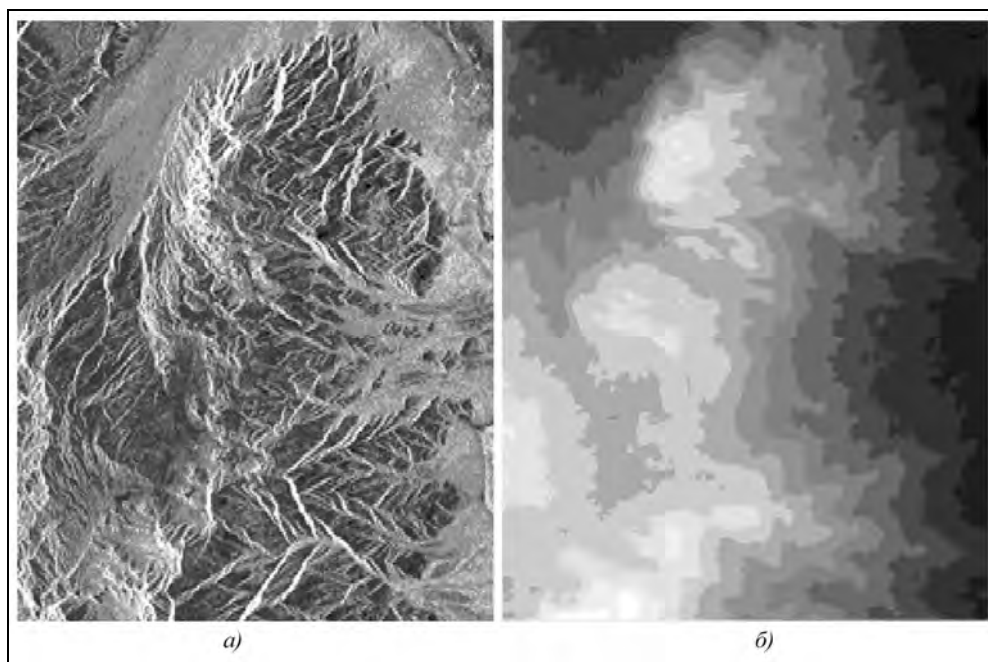


Рис. 9.23. Одно из РЛИ стереопары (*a*) и построенная по ним карта рельефа (*б*) (штат Невада, США; РСА Radarsat-1 [535])



углов визирования стереопары была в пределах  $5...30^\circ$ . Точность восстановления вертикальной составляющей при цифровой стереообработке зависит практически только от пространственной разрешающей способности радиолокатора. Это обусловлено тем, что цифровой корреляционный анализ снимков стереопары может быть сделан с точностью до величины элемента разрешения, которая для современных космических РСА составляет единицы метров. Автоматизация ответственной процедуры совмещения КРЛИ достигается путем иерархического (пирамидального) представления снимков с кратными масштабами разложения ( $8M_{RX}$ ,  $4M_{RX}$ ,  $2M_{RX}$ ,  $M_{RX}$ , где  $M_{RX}$  – межпиксельное расстояние исходного РЛИ) и применением картографической основы Global 30-Arc-Second DEM GTOPO30 на первом, самом грубом уровне [299].

На рис. 9.23 показан один из снимков стереопары на участок местности в штате Невада, США, полученный с помощью РСА Radarsat-1, а также построенная цифровая карта рельефа [535].

## **9.7. Интерферометрическая обработка радиолокационных снимков**

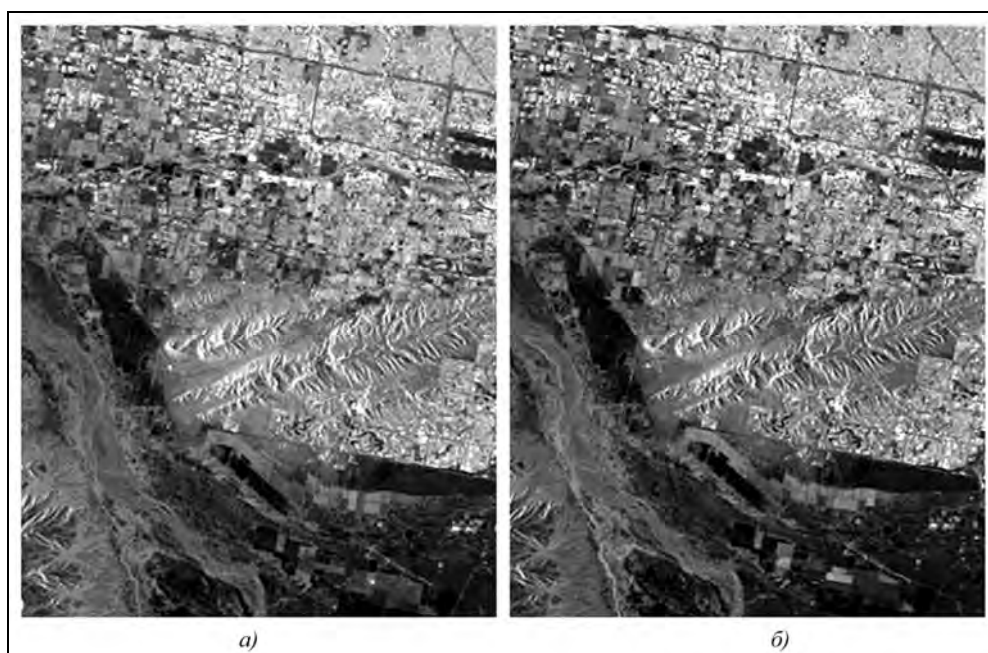
### **9.7.1. Получение цифровых карт рельефа местности**

Для построения цифровых карт рельефа (ЦКР) применяют интерферометрию поперек линии пути КА, реализуемую в однопроходном режиме, как в миссии SRTM на базе РСА SIR-C/X-SAR, с использованием тандема космических РСА либо межвитковой интерферометрии по паре комплексных РЛИ (основного и дополнительного), полученных на витках, разделенных по времени, но образующих интерференционную пару. Разрешающая способность ЦКР зависит от размера интерференционной базы и отношения сигнал/шум для наблюдаемой поверхности. Точность измерения высоты рельефа зависит от точности знания пространственного положения интерферометрической базы.

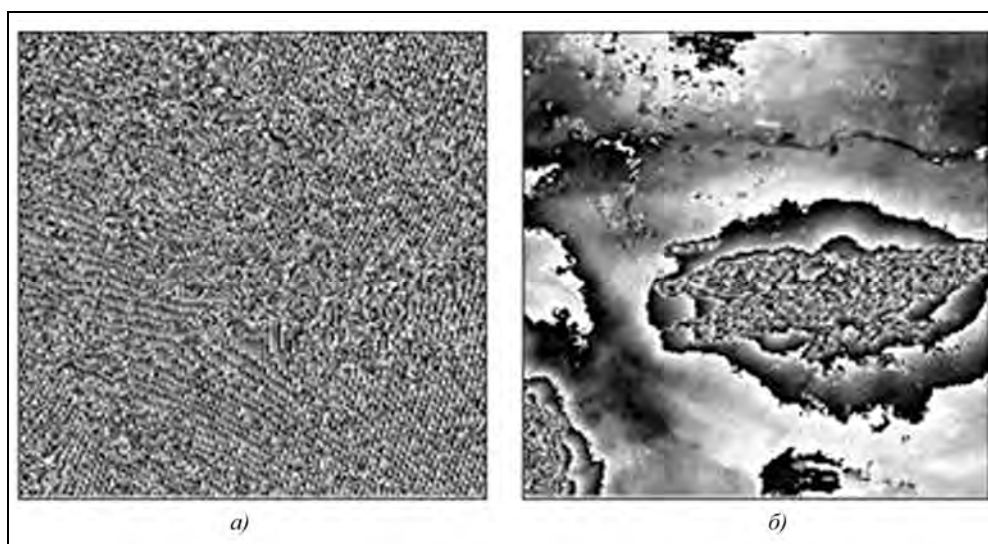
В настоящее время построение карт рельефа является рутинной процедурой, реализованной в большинстве программных пакетов обработки радиолокационной информации. Рассмотрим типовую последовательность операций по обработке полученных пар КРЛИ, которую проиллюстрируем на примере построения карт рельефа с помощью пакета PHOTOMOD-Radar, фирмы Racurs [191]. Аналогичным методом обрабатываются полученные в разное время КРЛИ заданных районов с целью выявления изменений окружающей обстановки (дифференциальная интерферометрия).

На приведенных ниже рис. 9.24–9.28 дана иллюстрация основных этапов обработки КРЛИ для построения ЦКР. После съемки и синтеза пары КРЛИ (рис. 9.24) выполняют следующие процедуры:

- 1) масштабирование дополнительного КРЛИ для совмещения его с основным либо преобразование обоих КРЛИ в плановую равномасштабную проекцию вдоль и поперек (горизонтальная дальность) линии пути;
- 2) построение точной 3D модели орбитального движения и расчет точного положения базовой линии;



**Рис. 9.24.** Снимки интерферометрической пары: район Феникс, США; РСА Radarsat-2; РЛИ от 04.05.2008 – основное (а) и РЛИ от 28.05.2008 – дополнительное (б) [191]



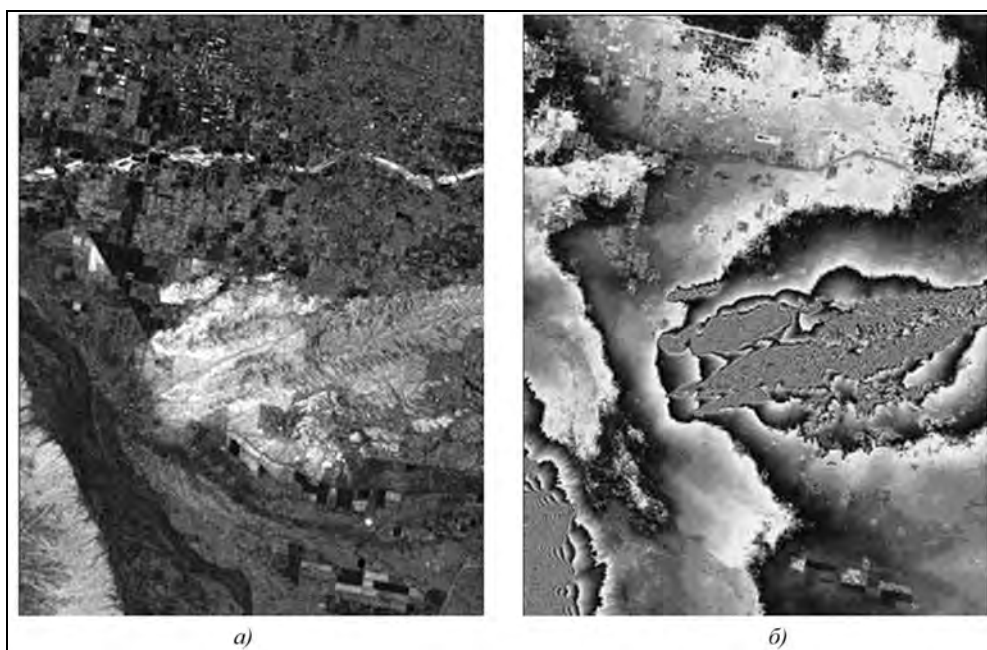
**Рис. 9.25.** Формирование разностной интерференционной картины: а – одно из исходных фазовых РЛИ (основное ФРЛИ); б – интерферограмма (фазоразностное РЛИ) с неоднозначностью фазы ( $0 \dots 2\pi$ ). На участках с резкой крутизной рельефа видны многократные переходы фазы через уровни  $0 \dots 2\pi$

3) точное совмещение обоих КРЛИ интерференционной пары, основанное на вычисленной геометрии орбит с их уточнением на основе корреляции амплитудных РЛИ, и с исключением аномальных значений по результатам статистической обработки. Используются быстрые алгоритмы интерполяции дополнительного РЛИ к координатам основного РЛИ с точностью до 1/5 размера пикселя или лучше, а также интерактивные процедуры совмещения по опознанным ориентирам;

4) спектральная фильтрация по азимуту и дальности для подавления спеклшума и уточнения положения базовой линии (быстрые алгоритмы оценки «декорреляции базовой линии») с целью получения оптимального качества интерференционной пары КРЛИ;

5) формирование интерферограммы (фазоразностного РЛИ) путем вычисления фазы от произведения основного КРЛИ на сопряженное дополнительное КРЛИ (рис. 9.25,б). Фазовая картина отображается в виде линий (фрингов), яркость (или цвет) которых соответствует одинаковым значениям фазы;

6) проверка когерентности пар КРЛИ (рис. 9.26, а);



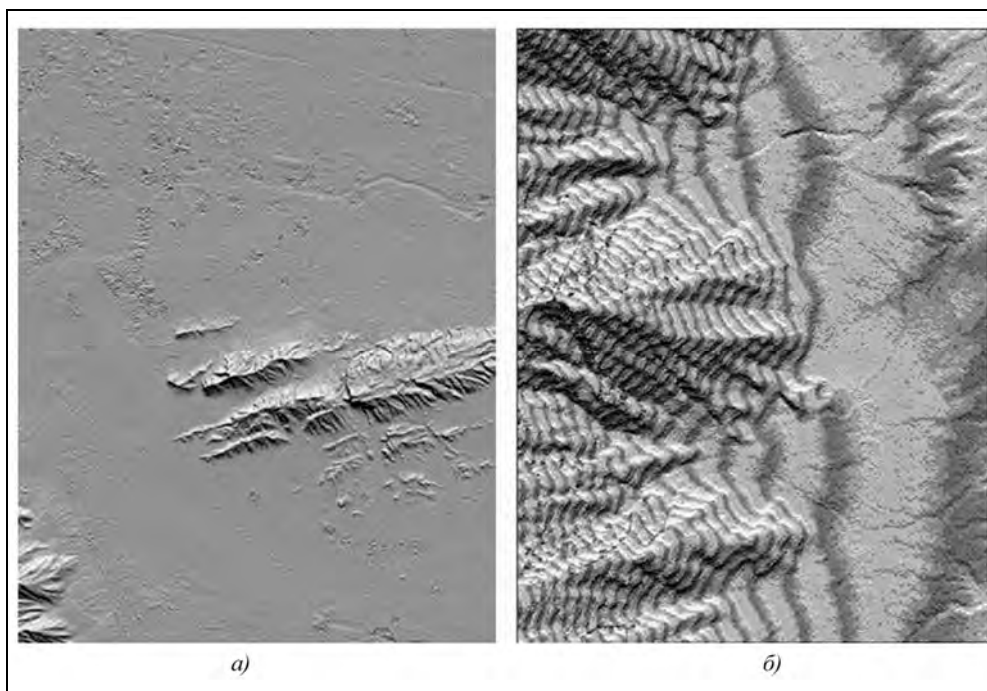
**Рис. 9.26.** Матрица когерентности (а), темные участки – низкая когерентность, светлые – высокая; интерферограмма с компенсацией набегов по плоской земле и азимуту и фильтрации (б)

7) корректировка интерферограммы с вычитанием составляющей для горизонтальной поверхности (рис. 9.26, б) или же для задач дифференциальной интерферометрии исключение фазы от известных ранее объектов. Разность фаз, определяющая рельеф местности, выражается через приращение фазы по отношению к горизонтальной поверхности. Заметим, что идеальная плоская горизонтальная по-

верхность не дает отраженного сигнала в сторону РЛС, поэтому речь идет о шероховатой горизонтальной поверхности, для которой актуальна проблема подавления флуктуаций сигнала, образующих спекл-шум;

8) оптимизация интерферограммы путем ее фильтрации в областях высокой когерентности перед процедурой развертывания фазы. Применяется также коррекция карты когерентности в соответствии со значением отношения сигнал/шум по участкам РЛИ;

9) развертывание фазы (устранение неоднозначности с периодом  $2\pi$ , рис. 9.27,*а*). Эта операция, наиболее ответственная для вычисления рельефа, требует применения специальных методов обработки – «метод остаточных цепочек», «ближайших соседей» и их модификаций, позволяющих во многих случаях полностью автоматизировать процесс развертывания фазы. Специальная тестовая программа позволяет интерактивно оценить точность развертывания фазы;



**Рис. 9.27.** Интерферограмма с развёрнутой фазой (*а*) и фрагмент совмещения (суммирования) интерферограмм с развёрнутой и неразвёрнутой фазами (*б*)

10) преобразование ФРЛИ с развёрнутой фазой в цифровую карту рельефа местности или в дифференциальное РЛИ. Рельеф формируется путем интегрирования разности фаз интерференционной пары с соответствующим пересчетом к высоте;

11) геокодирование – все радиолокационные продукты формируют в координатах на земной поверхности, а также преобразуют в картографические проекции (рис. 9.28,*б*).

На рис. 9.28 дано сравнение ЦКР, полученных PCA SRTM (интерферометрия с жесткой базой) и путем межвитковой интерферометрии снимков Radarsat-2, которые обладают лучшим пространственным разрешением и большей интерферометрической базой. Это обеспечивает более высокие разрешающую способность и точность построения ЦКР.

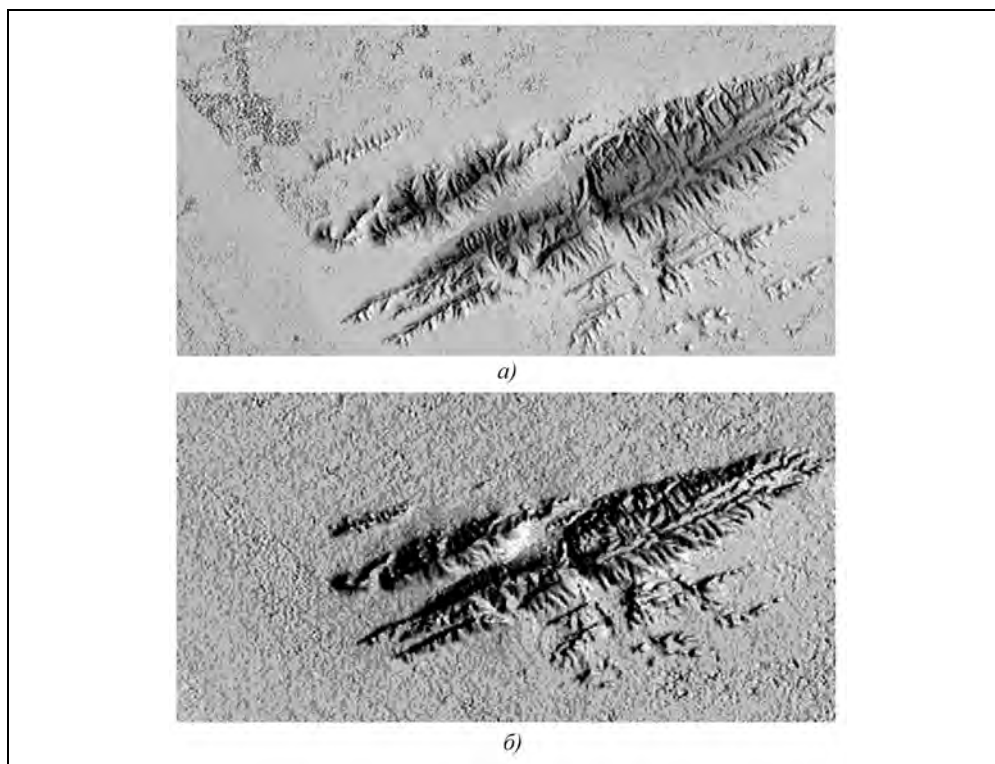


Рис. 9.28. Сравнение фрагментов цифровых карт рельефа для SRTM (а) и для Radarsat-2 (б)

### **9.7.2. Дифференциальная интерферометрия для обнаружения изменений в обстановке и измерения малых смещений объектов**

*Методы дифференциальной интерферометрии DInSAR* (Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry) – обработка КРЛИ, полученных с близких орбит (для сохранения когерентности), но в разное время, *позволяет решать следующие задачи* [71, 82–85, 224, 257, 275, 465]:

- обнаружение изменений в оперативной обстановке в районах наблюдения, сопровождающееся появлением и исчезновением объектов;
- обнаружение следов, оставленных пребыванием посторонних объектов на наблюдаемой территории, «примятости» травы после прохода человека (контроль несанкционированного доступа), следов шин автомобиля на грунтовой дороге и др.;

- выявление малых изменений геометрии подстилающей поверхности и объектов (зданий, инженерных сооружений).

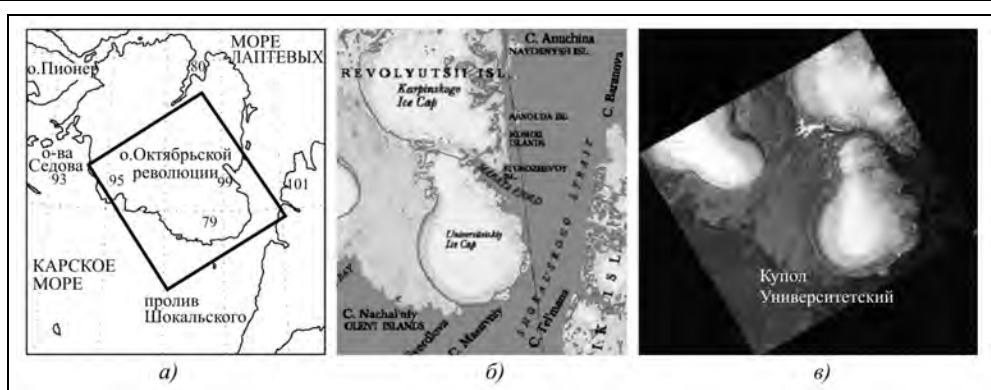
Особую актуальность имеет использование космических РСА для обследования больших площадей с целью обнаружения термокарстовых подвижек грунтов на нарушенных землях в зоне вечной мерзлоты и просадок грунта в местах интенсивной добычи углеводородов, шахтной добычи полезных ископаемых, представляющих потенциальную опасность для трубопроводов, дорог, жилых и промышленных объектов, что позволяет предотвратить экологический ущерб от нефтезагрязнений, сократить производственные затраты при эксплуатации и ремонте магистральных и внутрипромысловых трубопроводов [71].

Используется также развитие этого метода – обработка набора данных с малой интерферометрической базой SBAS (Small BAsline Subset), которая первоначально применялась к интерферограммам с разрешением ~100 м на площади 100×100 км [257, 275]. Этот метод основан на усреднении большого числа КРЛИ анализируемой территории.

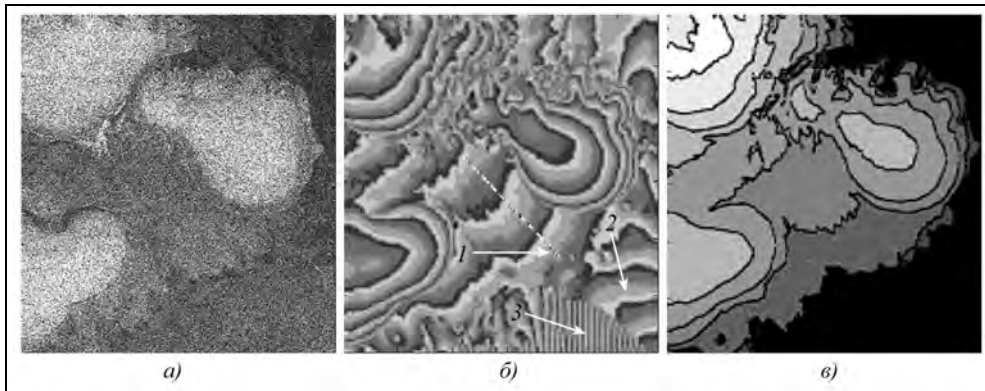
Использование интерферометрической обработки позволяет обнаруживать малые смещения поверхностей и объектов или деформации поверхностного слоя Земли. Ниже для примера приведены результаты интерпретации результатов обработки интерферометрической пары снимков, полученных с помощью РСА ERS-1 и ERS-2 по архипелагу Северная Земля (витки 24504 и 04831 соответственно 22 и 23 марта 1996 г.) [162\*]. Выбранный участок поверхности (79°16' с.ш. и 97°43' в.д., рис. 9.29) включает часть острова Октябрьской революции, острова Пионер, Седова и окружающую их морскую поверхность, покрытую в это время года льдами. В центре района – Фиорд Марата и купол Университетский с группой ледников в восточной части купола на спуске к проливу Шокальского. Высота купола Университетский составляет 806 м над уровнем моря, высота ледника Вавилова в левой части карты 713 м, купола Карпинского – 963 м. На рис. 9.30 приведены РЛИ, интерферограмма и ЦКР.

Операции интерферометрической обработки разности фаз комплексных РЛИ проводились отдельно по типам поверхности: только покрытая льдами, но содержащая естественный рельеф, суша (материковая часть) и море (полностью покрытое льдом). Предварительно из цифровой географической карты была изготовлена маска, делящая снимки на участки суша–море. На рис. 9.30, б приведены интерферограмма (как аргумент от комплексного перемножения двух кадров с компенсированным фазовым набегом по плоской земле) и рельеф местности, полученный из развёрнутой фазы только по суше. Точность восстановления рельефа, измеренная как СКО по нескольким контрольным точкам цифровой карты, составила около двух метров. Это является достаточно хорошим результатом для интерферометрической обработки данных РСА ERS-1/2. Следует отметить, что значения параллельной и перпендикулярной проекций базовой линии, предварительно рассчитанные по эфемеридам из состава служебной информации, были уточнены значениями, взятыми из каталога интерферометрических съёмов Европейского космического агентства. Эти значения основаны на апостериорных измерениях положений космических аппаратов в моменты съёмов в отличие от стандартных априорных данных, содержащихся в заголовке кадров.

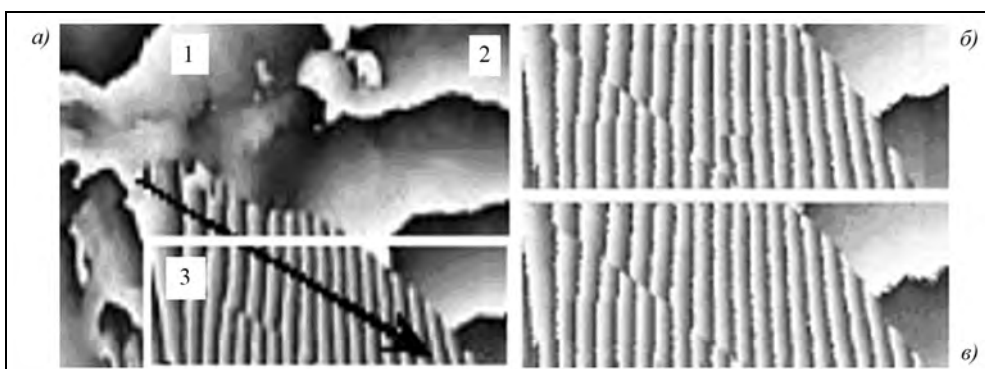
**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**



**Рис. 9.29.** Район интерферометрической съемки архипелага Северная Земля:  
*а, б* – карты района съемки; *в* – сглаженное амплитудное РЛИ в картографической проекции



**Рис. 9.30.** Исходное амплитудное РЛИ (*а*), интерферограмма (*б*) и ЦКР материковой части (*в*)  
 в системе координат наклонная дальность – азимут:  
*1* – модель интерферограммы линейного объекта, смещенного на  $\sim 1$  см ( $\lambda/8$ ) за время между съемками;  
*2, 3* – ледовые поля со сжатием на 0,2 % (*2*) и 2 % (*3*)



**Рис. 9.31.** Дифракционная картина по материалам обработки снимков ERS-1/ERS-2  
 по архипелагу Новая Земля (*а*) и фрагмент (*б*), модель интерферограммы (*в*);  
*1* – материковый участок; *2, 3* – ледовые поля

Чрезвычайный интерес представляет разностно-фазовая картина по морской поверхности, покрытой льдом. На интерферограмме рис. 9.30,б это участки 2, 3. Их увеличенный фрагмент показан на рис. 9.31. Поскольку заметный рельеф там отсутствует, то после компенсации набега фазы по плоской земле мы вправе были ожидать на этом участке более или менее равномерное фазовое поле. Однако на самом деле участок заполнен полосами (фрингами) изменения фазы от 0 до 360°, ориентированными в самых разных направлениях и имеющими различный период.

На интерферограмме заметны несколько отчётливо выраженных фазовых полей с примерно постоянным периодом следования фрингов. По-видимому, они соответствуют ледовым полям, разделённым разломами. Очевидно, столь интенсивный градиент фазы интерферограммы, наблюдаемый на морском льду, не может быть объяснён влиянием рельефа поверхности, даже если предположить наличие торосов или каких-либо иных естественных образований.

Для объяснения описанного выше явления было проведено моделирование с формированием разностно-фазовой картины от двух РСА с внесением в модель возмущений, приводящих к появлению эффектов, сходных с наблюдаемыми на реальных данных. Анализ показал, что квазипериодическая фазовая структура с линейным изменением периода фрингов с такими параметрами могла сформироваться не от перемещения, а от сжатия ледовых полей на ~0,2 % (участок 2) и ~2 % (участок 3).

На рис. 9.30, б добавлена модель интерферограммы линейного объекта, находящегося на материковой части, но смещенного поперек линии пути на ~1 см за время между съемками. Четкое искажение фазовой структуры иллюстрирует возможности интерферометрической обработки для выявления малых перемещений объектов и поверхностей. На амплитудном РЛИ смещение участка местности, соответствующего объекту, не обнаруживается. Аналогичный эффект на интерферограмме возникает при появлении (или исчезновении) за время между съемками новых объектов, которые при малом контрасте относительно окружающей местности могут не обнаруживаться на амплитудном РЛИ.

Технологии когерентного выявления изменений в окружающей обстановке широко используются в практике радиолокационного зондирования гражданского и военного применения.

### **9.7.3. Интерферометрическая обработка результатов поляриметрического зондирования**

Наиболее полная информация по данным радиолокационного зондирования может быть извлечена при амплитудной и фазовой обработке комплексных РЛИ, полученных поляриметрическими РСА, работающими в разных диапазонах волн [285]. Эта технология развивает методы «скалярной» интерферометрии – обработки пар КРЛИ, полученных в однополяриметрических режимах с формированием пространственной и/или временной интерферометрических баз для топографических измерений или оценки мелкомасштабных смещений земной поверхности и изменений геометрии объектов. Интерферометрия в сочетании с поляриметрией получила название «векторной интерферометрии» [86, 513, 514]. Применение этой технологии имеет ряд



новых приложений, например, исследования отражающих свойств объемных сред – растительности, снежно-ледового слоя.

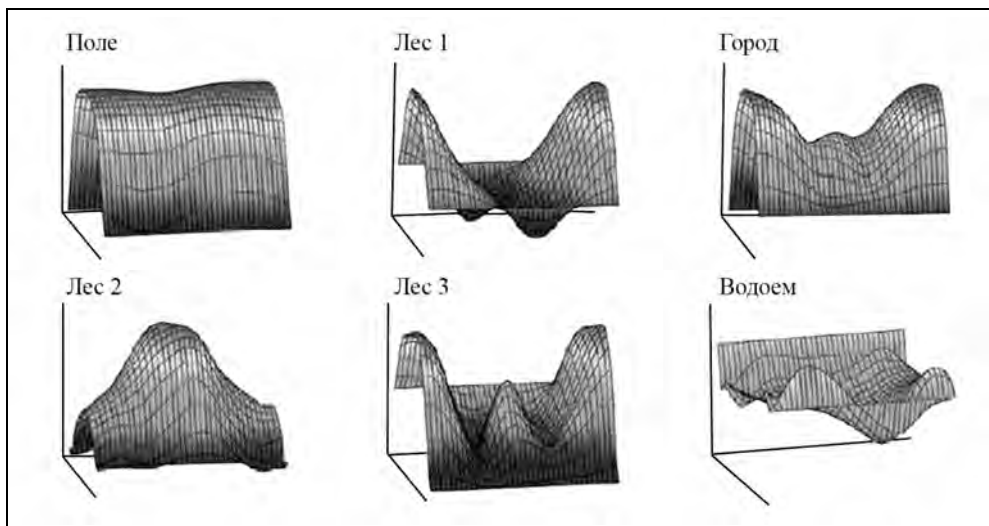
Возможности интерферометрических измерений определяются степенью взаимной когерентности КРЛИ при сравнении одинаковых поляриметрических составляющих. Этот комплексный параметр называют «интерферометрической когерентностью»

$$\gamma_{\text{cog}} = \frac{\langle z_1 z_2^* \rangle}{\sqrt{\langle z_1 z_1^* \rangle \langle z_2 z_2^* \rangle}}, \quad (9.24)$$

где  $z_1, z_2$  – комплексные коэффициенты обратного рассеяния, измеренные по первому и второму КРЛИ, угловые скобки означают усреднение по объекту наблюдения.

Такую же формулу можно применить для оценки взаимной когерентности любого сочетания поляризаций излучения и приема. Тогда она является формулой поляриметрической (векторной) когерентности.

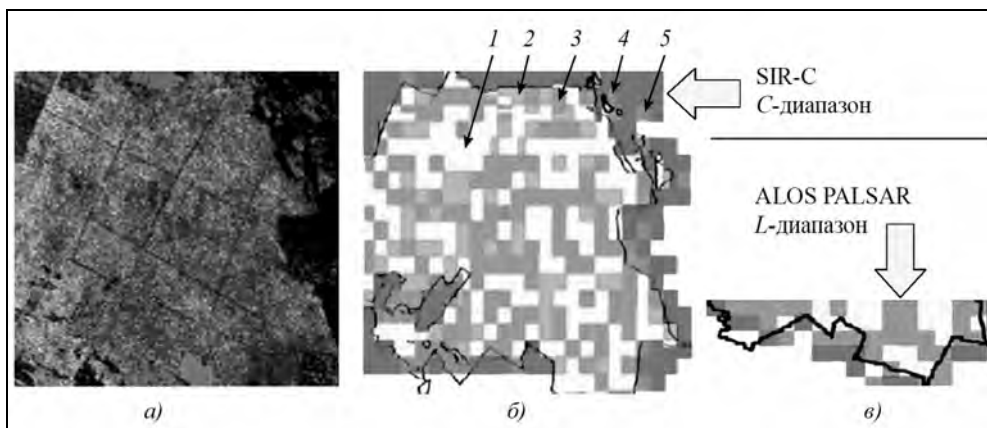
Поведение коэффициента когерентности, значения которого на матрице с размерностью КРЛИ лежат в пределах  $\pm 1$ , удобно отображать в виде поверхности («сигнатура когерентности»), характеризующей его модуль в трехмерном пространстве с координатами – ориентация вектора поляризации и значение угла эллиптичности. Ориентацию характеризуют углами, которые для линейных поляризаций при эллиптичности, равной нулю, составляют  $90^\circ$  – линейная вертикальная;  $0^\circ$  или  $180^\circ$  – линейная горизонтальная, промежуточные значения характеризуют угол поворота. Значения эллиптичности – от  $0$  до  $\pm 90^\circ$  (круговые с разными направлениями). Вид сигнатуры когерентности для разных типов поверхности (лес, поле, застроенная территория, вода) представлен на рис. 9.32. Информационными признаками являются взаимное положение максимумов и минимумов графика и его экстремальных линий.



**Рис. 9.32.** Сигнатуры когерентности для разных типов поверхности [86]

Из показанных на рис. 9.32 примеров большую вариабельность имеют сигнатуры когерентности для леса. Это свойство позволяет, в частности, оценивать сортовой состав лесных массивов, а также пирогенную и послерубочную динамику. Отмечено, что тип сигнатуры когерентности для леса зависит от диапазона волн: в *L*-диапазоне она близка к виду «лес1», а в *C*-диапазоне наблюдаются все три типа. Чем ниже частота, тем менее чувствительна когерентность к мелкомасштабным изменениям рассеивающей поверхности. При увеличении интервала между съемками возрастает разнообразие между сигнатурами когерентности, отражающей динамику состояния лесного покрова. Для других покровов наблюдается повторяемость формы сигнатуры когерентности независимо от частоты зондирования.

На рис. 9.33 приведены примеры классификации участка сельской местности по материалам поляриметрической съемки (ГГ, ГВ, ВВ), полученным с помощью PCA SIR-C в диапазонах волн *C* и *L* с временным интервалом двое суток, а также по данным PCA PALSAR. Показаны поляриметрическое РЛИ (рис. 9.33,а), в оригинале – псевдоцветное (RGB соответствует ГГ, ГВ, ВВ) и карты классификации по данным SIR-C (б) и PALSAR (в) (рис. 9.33,в).



**Рис. 9.33.** Классификация земных покровов по сигнатурам когерентности:  
а – РЛИ сельской местности (SIR-C); б и в – результаты классификации по данным SIR-C (б) и PALSAR (в);  
1 – «лес1»; 2 – «лес2»; 3 – «лес 3»; 4 – поле; 5 – редколесье [86]

Рассмотренная перспективная технология извлечения тематической информации из данных радиолокационного зондирования находится на стадии исследований. Она основана на анализе полной поляриметрической матрицы, получение которой требует больших ресурсов от PCA (удвоение потока данных) с ограничением реализуемых углов падения (из-за появления неоднозначности сигналов при удвоении частоты повторения для переключения поляризаций излучения). Целесообразно продолжение исследований по использованию этих информационных признаков в сочетании с методами псевдополной поляриметрии на базе двухполяризационных измерений, а также по конкретизации тематических задач, требующих применения усложненных режимов радиолокационной съемки.

## 9.8. Методы решения координатных задач по данным радиолокационного зондирования

### 9.8.1. Исходные данные для решения координатных задач по РЛИ

Решение координатной задачи в зависимости от размеров земной поверхности, отображенной на РЛИ, может выполняться различными методами радиолокационной фотограмметрии (радарграмметрии) по отдельным или по перекрывающимся РЛИ. При наличии фотоснимков данного участка земной поверхности решение координатной задачи может быть выполнено по перекрывающемуся РЛИ и фотоснимку или по стереопаре фотоснимков и одиночному РЛИ [76\*].

Перекрывающиеся РЛИ, обеспечивая стереоскопическое наблюдение и измерение построенной по ним геометрической модели земной поверхности, позволяют определять пространственные координаты объектов на ней, т.е. решать координатную задачу. Получение таких РЛИ, как показано ранее, может быть выполнено различными методами. Основными из них являются *двухсторонняя* и *односторонняя* РЛ-съемка, а также *РЛ-съемка с пересекающимися маршрутов*.

В общем случае для решения координатной задачи по РЛИ необходимо информационное обеспечение в виде навигационных данных и известных координат опорных точек земной поверхности. В качестве навигационных данных в этом случае может быть использована информация о координатах и скорости носителя РСА на различные моменты съемки, а также значения доплеровского сдвига частот для всех точек зондируемой поверхности. Обычно это требование выполняется, так как потребителю передаются первичные РЛИ с привязкой к наземным координатам (Georeferenced Radar Image) в координатах наклонная дальность – азимут или плановые РЛИ (формат GeoTIFF) в координатах горизонтальная дальность – азимут, снабженные GPS-данными. Значение азимутальной координаты соответствует нулю доплеровской частоты.

### 9.8.2. Решение координатной задачи по одиночному РЛИ

Каждой точке первичного РЛИ может быть поставлено в соответствие значение наклонной дальности от этой точки на местности до некоторой точки траектории носителя РСА, т.е. РЛИ-снимок является изображением местности в равнодальностной проекции. Связь между положением носителя РЛИ и точки местности по аналогии со случаем центральной проекции может быть установлена в общем случае соотношением

$$\mathbf{R}_T = \mathbf{R}_s - \mathbf{R}, \quad (9.25)$$

в котором  $\mathbf{R}_T$  и  $\mathbf{R}_s$  – векторы положения наблюдаемой точки на поверхности Земли и носителя РСА в принятой системе координат;  $\mathbf{R}$  – вектор наклонной дальности, измеренной в процессе РЛ-съемки.

В отличие от случая центральной проекции, в котором известно *направление* вектора  $\mathbf{R}$ , в равнодальностной проекции известна *длина вектора*  $\mathbf{R}$ . Следовательно, для применения выражения (9.25) необходимо дополнительно установить ориентацию вектора  $\mathbf{R}$  в заданной системе координат. Учтя данное обстоятельство, рассмотрим сущность определения координат точек местности по одиночному РЛИ.

В дополнение к системам координат, рассмотренным в разделе 5.1, введем координатную систему РЛ-снимка, характеризуемую номерами временных отсчетов по дальности (быстрое время) и азимуту (медленное время) относительно первого пикселя первой строки, полученного в результате фокусированного синтеза РЛИ. Наклонная дальность пикселей РЛИ определится формулой

$$R(m, n) = R_1 + \frac{c}{2F_s}(m - 1), \quad (9.26)$$

где  $R_1(m, n)$  – наклонная дальность начального отсчета  $m$  в каждой строке дальности с номером  $n$ ;  $c$  – скорость распространения радиоволн (ее зависимостью от характеристик трассы распространения пренебрежем);  $F_s$  – частота квантования сигнала по времени.

Временные отсчеты по азимуту

$$t_x(n) = t_1 + T_p(n - 1), \quad (9.27)$$

где  $t_1$  – время, определяющее положение платформы для первой строки дальности РЛИ;  $T_p$  – период повторения зондирующего сигнала РСА.

Рассмотрим геометрию обзора в гринвичской системе координат (ГСК), приведенную на рис. 9.34. Начнем с идеального случая движения КА по круговой орбите, когда точно известны текущие значения координат КА  $\mathbf{R}_s(n)$ , вектора скорости  $\mathbf{V}_s(n)$  и ускорения  $\mathbf{a}_s(n)$ . Не будем принимать во внимание атмосферные факторы, учет которых является отдельной задачей. В таком случае наиболее стабильными данными являются значение несущей частоты, временные отсчеты наклонной дальности и период повторения зондирующего сигнала.

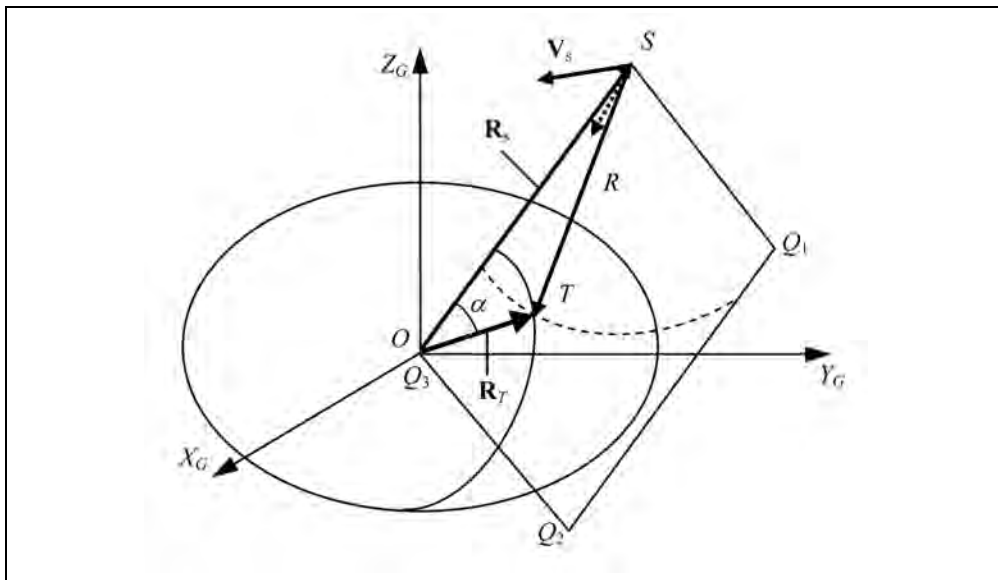


Рис. 9.34. Геометрия обзора в ГСК при решении координатной задачи по одиночному РЛИ (движение КА по круговой орбите)

Временной отсчет  $t_x(n)$  в момент нулевой доплеровской частоты опорной функции синтеза РЛИ образует в пространстве обзора плоскость визирования  $SQ_1Q_2Q_3$ , нормальную к вектору путевой скорости КА. При движении КА по круговой орбите плоскость визирования проходит через центр Земли и радиус-вектор КА  $\mathbf{R}_s(n)$ . Проведенная в этой плоскости окружность с центром в фазовом центре антенны и с радиусом  $R(m)$  является геометрическим местом точки на РЛИ. Плоскость визирования является также секущей земного эллипсоида (геоида, характеризующего реальную земную поверхность). Точки совпадения окружности  $R(m)$  с линией сечения соответствуют их отображению на РЛИ.

Уравнение плоскости визирования  $Q$

$$(\mathbf{Q}(n) - \mathbf{R}_s(n)) \mathbf{v}_s = 0, \quad (9.28)$$

где  $\mathbf{v}_s$  – орты вектора путевой скорости КА. Заметим, что в ГСК плоскость визирования не перпендикулярна плоскости орбиты КА.

Угол  $\alpha$  находят путем решения треугольника  $SOT$  по трем сторонам, учитывая, что географические координаты  $\varphi_T, \lambda_T$  цели  $T$  связаны с координатами КА  $\varphi_s, \lambda_s$  соотношениями

$$\begin{aligned} \lambda_T &= \lambda_s - \pi/2; \\ \varphi_T &= \arcsin\{\cos \varphi_s \cos \alpha\}. \end{aligned} \quad (9.29)$$

Высота цели относительно земного эллипсоида берется из картографических данных. В прожекторном режиме с максимальной апертурой синтеза можно уточнить высоту цели методом локальной автофокусировки PGA (подраздел 6.10.8).

При движении КА по эллиптической орбите появляется вертикальная составляющая скорости КА (см. раздел 5.6), что приводит к искривлению поверхности с нулевой доплеровской частотой.

В общем случае для вычисления координаты цели, зафиксированной на РЛИ, выполняют итерационные процедуры:

1) уравнение для доплеровской частоты:

$$F_{\text{Dop}} = \frac{2 \cdot (\mathbf{V}_o - (\Omega_{\text{earth}} \times \mathbf{R}_T))(\mathbf{R}_T - \mathbf{R}_s)}{\lambda R_T}; \quad (9.30)$$

2) уравнение для наклонной дальности цели:

$$R^2 = (\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_T)(\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_T); \quad (9.31)$$

3) уравнение земного эллипсоида (с поправкой на высоту точки наблюдения):

$$\frac{R_{TX}^2 + R_{TY}^2}{(a_e + h)^2} + \frac{R_{TZ}^2}{(b_e + h)^2} = 1, \quad (9.32)$$

где  $F_{\text{Dop}}$  – центральная доплеровская частота;  $\Omega_{\text{earth}}$  – угловая скорость вращения Земли;  $R$  – наклонная дальность визирования;  $a_e, b_e$  – большая и малая полуоси

Земли;  $h$  – высота цели над референц-эллипсоидом  $\mathbf{R}_e$ ;  $R_{TX}$ ,  $R_{TY}$ ,  $R_{TZ}$ , – проекции радиус-вектора точки визирования на ГСК;  $\lambda$  – длина волны РСА.

Высокая точность геометрических построений обеспечивается путем предварительного (прогнозного) и послесъемочного геокодирования. На первой стадии оценивают ошибки прогноза траектории, временные уходы параметров, модель геоида, цифровую модель рельефа и модель подстилающей поверхности, параметры взвешивания при синтезе РЛИ, а также атмосферные факторы. В [315] приведена *сводка погрешностей оценки координат целей при зондировании в X-диапазоне волн применительно к TerraSAR-X*:

1) погрешности позиционирования КА, три градации СКО: первоначальные данные GPS – 10 м, повышенная точность GPS – 2 м, высокая точность GPS – 0,1 м;

2) рефракция радиоволн в атмосфере – ионосфере и тропосфере. Их влияние на точность позиционирования КА пренебрежимо мало. Задержка сигнала из-за рефракции в ионосфере около 1 м при  $TEC=150$  TECU (см. подраздел 6.10.4) и углах визирования  $40,9^\circ$ . Тропосферная рефракция включает две составляющие – гидростатическую и составляющую, обусловленную влажностью, соответственно 2,3 м и 0...3 м при зондировании в зенит. Максимальная задержка в одну сторону при угле визирования  $40,9^\circ$  около 3,3 м на уровне моря;

3) ошибки доплеровского центроида и взвешивающей функции. Обычно эти параметры синтеза РЛИ не включают в спецификацию информационного продукта. При ошибках по доплеровской частоте в пределах 1...10 Гц ожидаемые погрешности оценки координат составляют 1...10 м;

4) погрешности координатной привязки пикселей РЛИ при наличии идеальной цифровой карты рельефа (ЦКР) для углов визирования  $18,5$  и  $40,9^\circ$  имеют величину 0,6 и 0,3 м, а без ЦКР, но при наличии опорных ориентиров на местности – соответственно 8,7 и 4,2 м.

Отмечается, что для получения высокой точности привязки пикселей РЛИ в прожекторном режиме желательно использовать двухчастотную прецизионную аппаратуру GPS с точностью позиционирования СКО 0,1 м. В режиме Скансар погрешности GPS не должны превышать 2 м СКО. Исходные погрешности GPS 10 м (СКО) допустимы только для информационных продуктов низкой точности с погрешностями порядка 30 м. Одна из сложностей привязки РЛИ к картам связана с различием основных карт, особенно крупномасштабных (1:25000 и крупнее), используемых в хозяйственной деятельности.

### **9.8.3. Определение элементов внешнего ориентирования антенны**

По своей сути определение элементов внешнего ориентирования антенны РСА (~центра масс КА) является задачей формирования выбранной (в нашем случае параметрической) модели одиночного РЛИ. Решение ее может выполняться либо по координатам опорных точек, либо по навигационным данным (GPS, ГЛОНАСС), либо по тем и другим данным.

В случае использования координат опорных точек формирование модели одиночного РЛИ, независимо от ее вида, связано с необходимостью решения системы нелинейных уравнений

$$R[X(\mathbf{U}, Z_i), Y(\mathbf{U}, Z_i)]_i - R(X_i, Y_i) = 0; \quad i = 1, n, \quad (9.33)$$

где  $R[X(\mathbf{U}, Z_i), Y(\mathbf{U}, Z_i)]_i$  – значение функционала, задающего принятую математическую модель в  $i$ -й опорной точке;  $\mathbf{U}(u_1, u_2, u_3, \dots, u_l)^T$  – вектор неизвестных параметров принятой математической модели размером  $l \times 1$ ;  $Z_i$  – геодезическая высота опорной точки;  $n$  и  $l$  – соответственно число опорных точек и параметров принятой математической модели.

Решение системы уравнений (9.33) есть задача нахождения оценок неизвестных величин, которая решается по методу наименьших квадратов.

**Использование информации о рельефе.** При определении координат точек местности по РЛИ с известными элементами внешнего ориентирования антенны РСА и наличием информации о рельефе местности заключается в следующем. Пусть информация о рельефе представлена в виде множества  $\{H\} = \{X_{T1}Y_{T1}H_1, X_{T2}Y_{T2}H_2, \dots\}$ , которое определяет значения высот, например, над уровневой поверхностью  $E_0$ , для точек местности с координатами  $X_{Ti}$  и  $Y_{Ti}$ .

На начальном приближении, принимая  $Z_i = Z_E = H_0$ , определяют координаты  $X_{Ti}^E, Y_{Ti}^E$  точки местности. По найденным таким образом координатам  $X_{Ti}^E, Y_{Ti}^E$  выбирают значения  $H'_i$  из множества  $\{H\}$ . При правильном определении высоты точки местности должно обеспечиваться следующее условие:

$$|Z_i - Z'_i| \leq \varepsilon, \quad (9.34)$$

где  $Z'_i = H'_i - H$ ;  $\varepsilon$  – заранее заданное число.

Очевидно, что данное условие не всегда будет выполняться при первом приближении. Поэтому, используя полученное значение  $Z'_i$ , по формулам (9.25), (9.28), (9.30)–(9.33) находят новые координаты  $X_{Ti}$  и  $Y_{Ti}$ , а по ним – новое значение  $H'_i$  из множества  $\{H\}$  до тех пор, пока не будет выполняться данное условие.

Величина  $\varepsilon$  может быть вычислена по формуле

$$\varepsilon = \delta h = H_0 \left\{ H_0^2 + \delta D \left[ \delta D + 2(R^2 - H^2) \right] \right\}^{1/4}, \quad (9.35)$$

в которой

$$\delta D = \left[ R_i^2 - (\delta h - H)^2 \right]^{1/2} - (R_i^2 - H_i^2)^{1/2}, \quad (9.36)$$

где величина  $\delta D$  – допустимая ошибка определения положения точки местности в плоскости радиолокационного зондирования.

#### 9.8.4. Решение координатной задачи по стереопаре РЛИ земной поверхности

Определение пространственных координат точек местности по двум РЛИ, полученным с помощью РСА, может быть сведено к пространственной засечке двумя наклонными дальностями  $R_1$  и  $R_2$  в плоскости радиолокационного зондирования одного из снимков стереопары. Получение стереопары возможно при обзорах с разной стороны, на разных восходящем и нисходящем витках либо при разных углах падения. В зависимости от размера стереометрической базы может быть использована интерферометрическая обработка комплексных РЛИ либо некогерентная стереометрия, рассмотренные в подразделах 9.6.4 и 9.7.1.

В РСА с АФАР возможно получение стереопары за один проход в скошенном (переднебоковом или заднебоковом) режиме обзора или при сочетании бокового и скошенного режимов. Так, на рис. 9.35 показана геометрия съемки стереопары в скошенном переднебоковом обзоре, когда КА находится в точке  $S_A$  и имеет вектор скорости  $\mathbf{V}_A$ . Плоскость визирования  $S_A Q_{A1} Q_{A2} Q_{A3}$  отклонена от нормали к вектору скорости  $\mathbf{V}_A$  на угол  $-\psi$  (скошенный обзор левым бортом вперед) и не проходит через центр Земли, что обусловлено движением КА по эллиптической орбите. В точке  $S_B$  имеем случай бокового обзора, плоскость визирования  $S_B Q_{B1} Q_{B2} Q_{B3}$  нормальна на вектору путевой скорости и также отклонена от центра Земли.

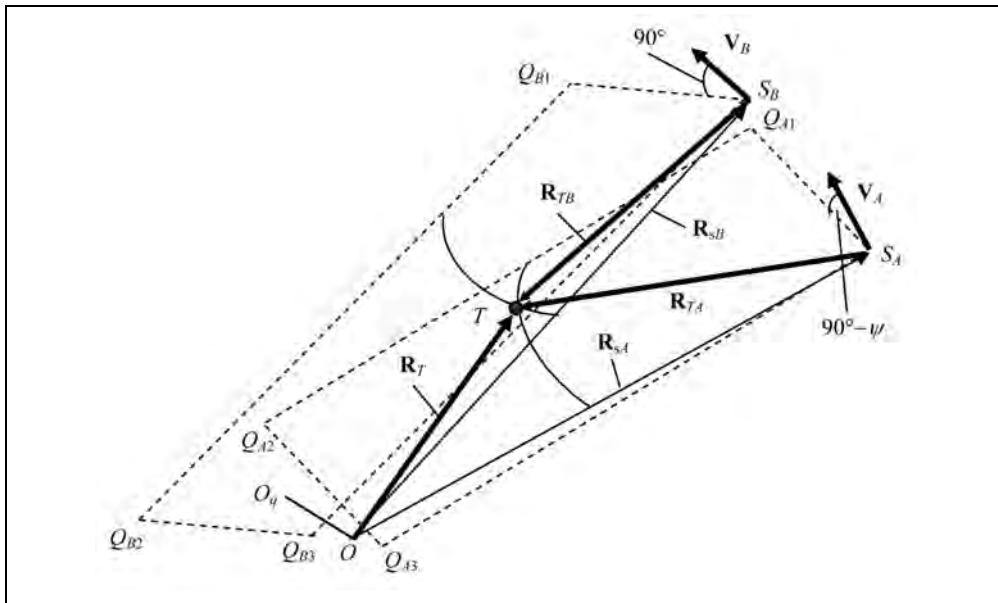


Рис. 9.35. Геометрия плоскостей визирования стереопары при комбинации бокового и скошенного обзоров

Известными параметрами движения являются моменты времени  $t_A$ ,  $t_B$ , векторы координат КА  $\mathbf{R}_{sA}$ ,  $\mathbf{R}_{sB}$ , векторы скоростей  $\mathbf{V}_A$ ,  $\mathbf{V}_B$ , наклонные дальности визи-



**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

рования цели  $R_A$ ,  $R_B$ , доплеровские частоты синтеза РЛИ  $F_{\text{Доп}A}$  и  $F_{\text{Доп}B}$ . В частном случае бокового обзора для одного из РЛИ  $F_{\text{Доп}B}=0$ .

Рассмотрим показанную на рис. 9.36 плоскость визирования бокового обзора  $S_B Q_{B1} Q_{B2} Q_{B3}$ , нормальную к вектору  $\mathbf{V}_B$  и проходящую через фазовый центр антенны (~центр масс КА) точку  $S_B$ . Уравнение плоскости визирования имеет вид

$$v_{Bx}^0 (x - S_{Bx}) + v_{By}^0 (y - S_{By}) + v_{Bz}^0 (z - S_{Bz}) = 0 \quad (9.37)$$

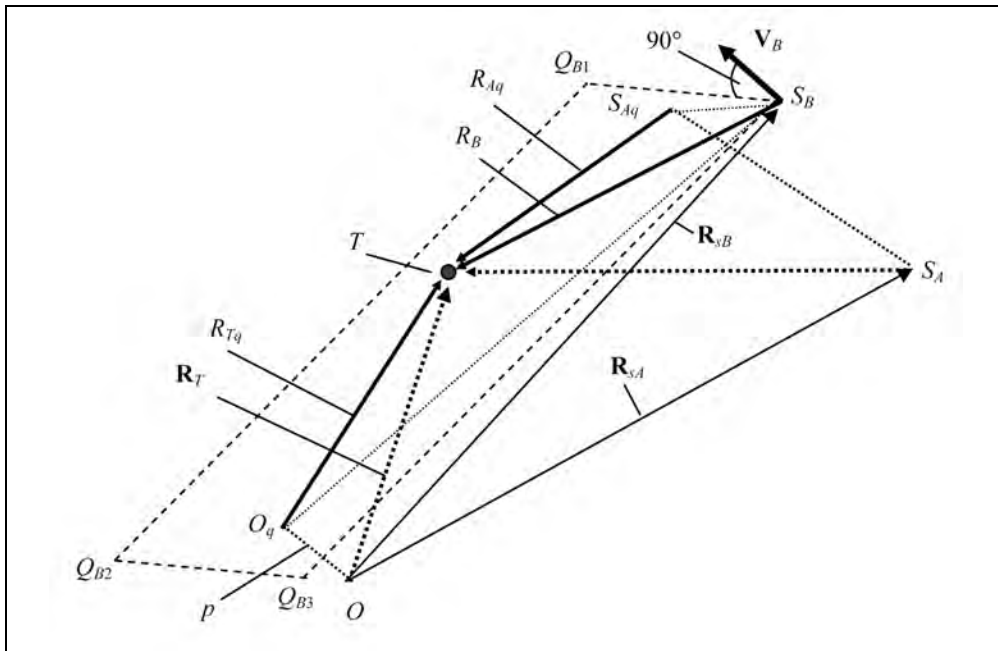
или  $v_{Bx}^0 x + v_{By}^0 y + v_{Bz}^0 z - p = 0$ ,

где  $v_{Bx}^0, v_{By}^0, v_{Bz}^0$  – направляющие косинусы вектора скорости КА в ГСК;  $p = v_{Bx}^0 S_{Bx} + v_{By}^0 S_{By} + v_{Bz}^0 S_{Bz}$  – расстояние плоскости от начала.

Определим на плоскости визирования проекции центра Земли  $\mathbf{O}_q$  и положения КА  $\mathbf{S}_{Aq}$  в момент времени  $t_A$

$$\mathbf{O}_q = O_q \{O_{qx}, O_{qy}, O_{qz}\} = \{v_{Bx}^0 S_{Bx}, v_{By}^0 S_{By}, v_{Bz}^0 S_{Bz}\}; \quad (9.38)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{Aq} &= S_{Aq} \{S_{Aqx}, S_{Aqy}, S_{Aqz}\} = \\ &= \{v_{Bx}^0 (S_{Ax} - S_{Bx}), v_{By}^0 (S_{Ay} - S_{By}), v_{Bz}^0 (S_{Az} - S_{Bz})\}. \end{aligned} \quad (9.39)$$



**Рис. 9.36.** Геометрические построения в плоскости визирования при решении координатной задачи по перекрывающимся РЛИ, полученным в режимах скошенного и бокового обзора

Длину проекции на плоскость визирования  $R_{Aq}$  для расстояния до цели  $R_A$  в первом положении КА  $S_A$  находим из уравнения

$$R_{Aq}^2 = R_{sA}^2 - S_{Aq}^2 = R_{sA}^2 - (S_{Aqx}^2 + S_{Aqy}^2 + S_{Aqz}^2). \quad (9.40)$$

Проекция вектора КА  $S_B$  на плоскость визирования равна (линия  $O_q S_B$ )

$$R_{sBq}^2 = |\mathbf{R}_{sB} - \mathbf{O}_q|^2 = (R_{sBx} - O_{qx})^2 + (R_{sBy} - O_{qy})^2 + (R_{sBz} - O_{qz})^2. \quad (9.41)$$

Вычисляем расстояние между точками  $S_{Aq}$  и  $S_B$

$$(S_{Aq} S_B)^2 = (S_{Aqx} - S_{Bx})^2 + (S_{Aqy} - S_{By})^2 + (S_{Aqz} - S_{Bz})^2. \quad (9.42)$$

Далее следует выполнить триангуляционную задачу вычисления координаты цели  $T$  по трем сторонам треугольника с вершинами в точках  $T$ ,  $S_B$ ,  $S_{Aq}$ , после чего из треугольника с вершинами  $T$ ,  $S_B$ ,  $O_q$  находим проекцию радиус-вектора цели  $R_{Tq}$  на плоскость визирования. Затем находим локальный радиус Земли и высоту цели над референц-эллипсоидом на широте цели  $\varphi_T$

$$R_T = \sqrt{R_{Tq}^2 + p^2}; \quad (9.43)$$

$$h = R_T - R_e(\varphi_T).$$

Рассмотренный случай сочетания бокового обзора со скошенным обзором пригоден для решения координатной задачи некогерентными методами, поскольку размеры стереобазы превышают интервал корреляции флуктуаций отраженных от местности сигналов. При наличии постоянных отражателей можно использовать интерферометрическую съемку в однопроходном скошенном режиме с малой базой, обеспечивающей когерентность принимаемых сигналов [23].

### **9.8.5. Совместная обработка перекрывающихся космических фотоснимков и РЛИ**

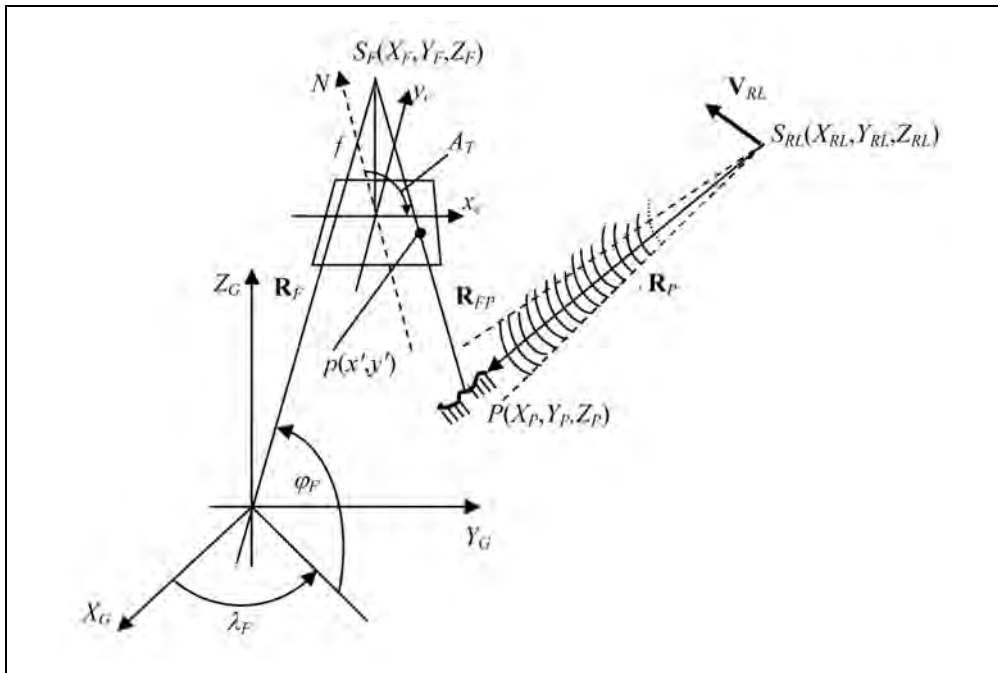
*Перекрывающийся космический снимок в центральной проекции и РЛИ.* Совместная обработка данных о местности, получаемых различными системами, в первую очередь фотографической и радиолокационной аппаратурой, является одним из основных направлений совершенствования средств и методов дистанционного зондирования. Так, современные радиолокационные системы, являясь всепогодными, используются в любое время суток и имеют независимое от дальности разрешение на земной поверхности, приближающееся к уровню разрешения оптических систем. С другой стороны, фотографическая аппаратура не только является наиболее освоенной в практике дистанционного зондирования, но и может работать в многоспектральном режиме в пределах видимого диапазона электромагнитных волн.

Совместная обработка РЛИ и фотоснимков позволяет расширить области их применения в первую очередь за счет повышения информационного содержания данных, получаемых при дистанционном зондировании.

РЛИ и фотоснимок одного участка земной поверхности обеспечивают наблюдение его с различных точек визирования, что обусловлено различиями основных

принципов формирования их изображений. Эта особенность перекрывающихся РЛИ и фотоснимков позволяет решать координатную задачу. Ее сущность в данном случае заключается в том, что положение точки местности, изобразившейся на перекрывающихся космическом фотоснимке центральной проекции и РЛИ, определяется направлением проектирующего луча  $\mathbf{R}_F$  и наклонной дальностью  $\mathbf{R}_{RL}$ , расположенной в плоскости радиолокационного зондирования (рис. 9.37). При наличии информации о доплеровском сдвиге частоты отраженного от точки  $P$  местности радиосигнала положение данной плоскости может быть однозначно определено в пространстве.

Рассмотрим гринвичскую систему координат  $O_G X_G Y_G Z_G$ . Предположим, что в ней известны координаты  $X_F, Y_F, Z_F$  и  $X_{RL}, Y_{RL}, Z_{RL}$  центров проектирования фотоаппарата  $S_F$  и радиолокатора  $S_{RL}$ , а также угловые элементы внешнего ориентирования фотоснимка – географическая широта  $\varphi_F$ , долгота  $\lambda_F$  и угол отклонения от надира  $A_T$  (рис. 9.37). Известны также координаты  $x', y'$  и  $x_r, y_r$  соответственных точек на фотоснимке и РЛИ.



**Рис. 9.37.** Решение координатной задачи по перекрывающемуся космическому фотоснимку в центральной проекции и РЛИ

Проведем расчет координат точки  $P$  отдельно по фотоснимку и РЛИ. В первом случае (обозначим их  $X_{Fp}, Y_{Fp}, Z_{Fp}$ ) можно воспользоваться известными формулами для одиночного фотоснимка:

$$X_{Fp} = X_F + NX'; Y_{Fp} = Y_F + NY'; Z_{Fp} = Z_F + NZ', \quad (9.44)$$

в которых

$$\begin{aligned} X' &= a_1 x' + a_2' y' - a_3 f ; \\ Y' &= b_1 x' + b_2' y' - b_3 f ; \\ Z' &= c_1 x' + c_2 y' - c_3 f , \end{aligned} \quad (9.45)$$

где  $X', Y', Z'$  – пространственные координаты точки  $P$  на фотоснимке;  $N$  – масштабный множитель;  $a_i, b_i, c_i$  – направляющие косинусы, вычисленные по значениям угловых элементов внешнего ориентирования;  $f$  – фокусное расстояние.

Определим значение  $N$  в выражении (9.44). С этой целью воспользуемся соотношениями между координатами точки  $P$  местности и центра проектирования  $S_{RL}$ , устанавливаемые посредством определения наклонной дальности

$$R^2 = (X_P - X_{RL})^2 + (Y_P - Y_{RL})^2 + (Z_P - Z_{RL})^2 . \quad (9.46)$$

Подставив (9.44) в (9.46) и разрешив последнее относительно  $N$ , получим

$$N = \frac{K_1 \pm (K_1^2 - K_1 K_2)^{1/2}}{K_3} , \quad (9.47)$$

где

$$\begin{aligned} K_1 &= (X_F - X_{RL}) X' + (Y_F - Y_{RL}) Y' + (Z_F - Z_{RL}) Z' ; \\ K_2 &= (X_F - X_{RL})^2 + (Y_F - Y_{RL})^2 + (Z_F - Z_{RL})^2 - R^2 ; \\ K_3 &= X'^2 + Y'^2 + Z'^2 . \end{aligned} \quad (9.48)$$

За окончательное значение  $N$  в (9.47) принимается близкое к  $N = H_F/f$ , где  $H_F$  – высота фотографирования.

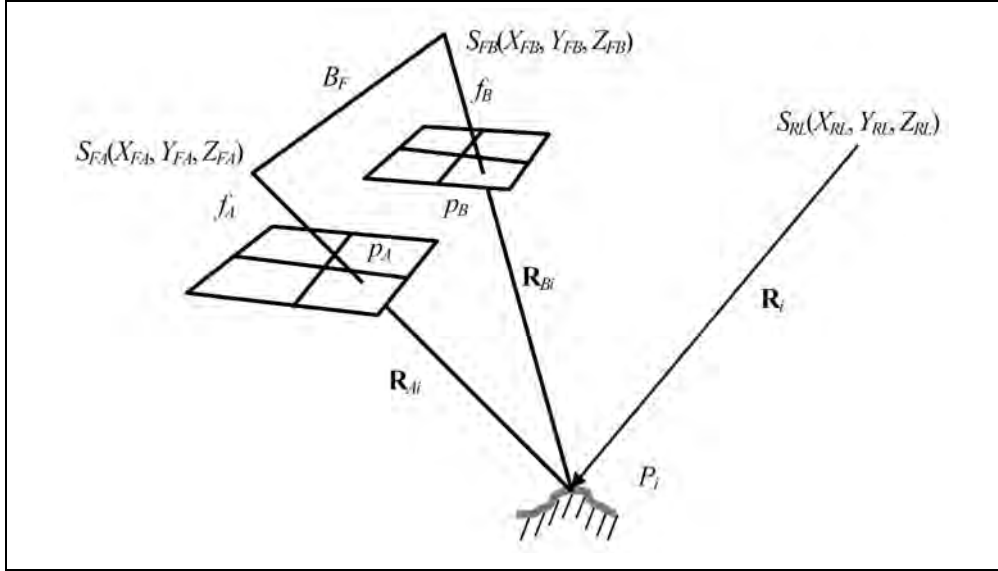
Анализ приведенных соотношений показывает, что для определения пространственных координат точек местности необходимо иметь угловые элементы внешнего ориентирования фотоснимка. Следует отметить, что для приведенных процедур могут использоваться не только РЛИ, синтезированные с нулевой доплеровской частотой, но и полученные при помощи опорной функции, смещенной по доплеровской частоте (при скошенном обзоре). Тогда по РЛИ могут быть оценены угловые элементы внешнего ориентирования как для РЛИ, так и для одиночных фотоснимков и стереопар.

**Определение угловых элементов внешнего ориентирования фотоснимков с использованием РЛИ.** В процессе дистанционного зондирования различными типами съемочных средств возможно получение РЛИ, которые перекрываются как с отдельным фотоснимком, так и со стереопарой фотоснимков. В этих условиях возможно определение угловых элементов внешнего ориентирования фотоснимков, перекрывающихся с РЛИ.

Примем, что по данным навигационного определения снимков (включая внешние траекторные измерения и бортовую аппаратуру позиционирования) из-

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

вестны координаты центров проектирования  $X_{FA}, Y_{FA}, Z_{FA}$  и  $X_{FB}, Y_{FB}, Z_{FB}$  левого  $A$  и правого  $B$  фотоснимков, а также  $X_{RL}, Y_{RL}, Z_{RL}$  РЛИ (рис. 9.38).



**Рис. 9.38.** Прямая засечка по перекрывающимся фотоснимкам и РЛИ

Пусть при наблюдении точки  $P_i$  на фотоснимках известны координаты КА  $S_{FA}$  и  $S_{FB}$  с  $S_{RL}$  в момент съемки и направления векторов  $R_{Ai}$ ,  $R_{Bi}$  на точку  $P_i$ . По радиолокационному снимку определяется наклонная дальность  $R_i$  в плоскости, проходящей через фазовый центр антенны радиолокатора (близкий к центру масс КА) и нормальной к вектору путевой скорости КА. В процессе совместной обработки стереопары фотоснимков и РЛИ основным является определение квазидальностей  $R_{Ai}$  и  $R_{Bi}$  до точек земной поверхности  $P_i$ , изобразившихся на фотоснимках и РЛИ. Для этого, выполняя взаимное ориентирование фотоснимков, строят аналитически геометрическую модель местности по фотоснимкам. Измеряют координаты точек местности на фотоснимках  $x_{Ai}$ ,  $y_{Ai}$  и  $x_{Bi}$ ,  $y_{Bi}$ .

Далее получают значения квазидальностей  $R_{Ai}$  и  $R_{Bi}$  по формулам

$$R_{Ai} = \left( N_i^2 \cdot (X_A'^2 + Y_A'^2 + Z_A'^2) \right)^{1/2}; \quad (9.49)$$

$$R_{Bi} = \left( N_i^2 \cdot (X_B'^2 + Y_B'^2 + Z_B'^2) \right)^{1/2},$$

в которых

$$N = \frac{B_F Z'_B}{X'_A Z'_B + X'_B Z'_A}; \quad (9.50)$$

$$X' = a_1 x + a_2 y - a_3 f; \quad Y' = b_1 x + b_2 y - b_3 f; \quad Z' = c_1 x + c_2 y - c_3 f;$$

$$B_F = \left[ (X_{FA} - X_{FB})^2 + (Y_{FA} - Y_{FB})^2 + (Z_{FA} - Z_{FB})^2 \right]^{1/2}.$$

Здесь  $X'_A, Y'_A, Z'_A$  и  $X'_B, Y'_B, Z'_B$  – пространственные координаты точки  $P$  на левом и правом фотоснимках;  $a_i, b_i, c_i$  – значения направляющих косинусов, вычисляемые по элементам взаимного ориентирования левого и правого фотоснимков;  $N$  – масштабный множитель.

Выбор систем координат и элементов взаимного ориентирования фотоснимков при определении квазидальностей может быть произвольным.

Получив значения квазидальностей  $R_{Ai}, R_{Bi}$  по фотоснимкам, рассчитывают соответствующие им наклонные дальности до РЛС  $R_{Api}$  и  $R_{Bpi}$ . В результате каждой точке, изобразившейся на фотоснимках и РЛИ, будут соответствовать три наклонные дальности  $R_{Ai}, R_{Bi}$ , и  $R_i$  из центров проектирования, положение которых определено в заданной системе координат.

Пространственные координаты точек местности, изобразившихся на фотоснимках и РЛИ, могут быть определены по формулам

$$\begin{aligned} X_{Pi} &= g'_1 + h'_1 Z_P; \\ Y_{Pi} &= g'_2 + h'_2 Z_P; \\ Z_{Pi} &= \frac{-N - (N^2 - ML)^{1/2}}{M}, \end{aligned} \quad (9.51)$$

где

$$g'_1 = \frac{f_1(Y_{RL} - Y_{FA}) - f_2(Y_{FB} - Y_{FA})}{(X_{FB} - X_{FA})(Y_{RL} - Y_{FA}) - (X_{RL} - X_{FA})(Y_{FB} - Y_{FA})}; \quad (9.52)$$

$$g'_2 = \frac{f_2(X_{FB} - X_{FA}) - f_1(X_{RL} - X_{FA})}{(X_{FB} - X_{FA})(Y_{RL} - Y_{FA}) - (X_{RL} - X_{FA})(Y_{FB} - Y_{FA})};$$

$$h'_1 = \frac{(Y_{FB} - Y_{FA})(Z_{RL} - Z_{FA}) - (Y_{RL} - Y_{FA})(Z_{FB} - Z_{FA})}{(X_{FB} - X_{FA})(Y_{RL} - Y_{FA}) - (X_{RL} - X_{FA})(Y_{FB} - Y_{FA})}; \quad (9.53)$$

$$h'_2 = \frac{(X_{RL} - X_{FA})(Z_{FB} - Z_{FA}) - (X_{FB} - X_{FA})(Z_{RL} - Z_{FA})}{(X_{FB} - X_{FA})(Y_{RL} - Y_{FA}) - (X_{RL} - X_{FA})(Y_{FB} - Y_{FA})};$$

$$d_{11} = \left[ (X_{FB} - X_{FA})^2 + (Y_{FB} - Y_{FA})^2 + (Z_{FB} - Z_{FA})^2 \right]^{1/2}; \quad (9.54)$$

$$d_{12} = \left[ (X_{FA} - X_{RL})^2 + (Y_{FA} - Y_{RL})^2 + (Z_{FA} - Z_{RL})^2 \right]^{1/2};$$

$$f_1 = \frac{1}{2}(R_{Ai}^2 - R_{Bi}^2 + d_{11}^2); \quad (9.55)$$

$$\begin{aligned} f_2 &= \frac{1}{2} (R_{Ai}^2 - R_{Bi}^2 + d_{12}^2); \\ M &= 1 + h_1'^2 + h_2'^2; \\ N &= g_1' h_1' + g_2' h_2'; \\ L &= g_1'^2 + g_2'^2 - R_{Ai}^2. \end{aligned} \tag{9.56}$$

Полученные по формулам (9.51)–(9.56) координаты точек принимают за опорные, которые далее используют при определении угловых элементов внешнего ориентирования фотоснимков известными в фотограмметрии методами

---

## Глава 10

# ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТУРЫ РЛН И ПРОЦЕССОВ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАЦИОННОМ ТРАКТЕ

### 10.1. Исходные положения

Современная технология создания и совершенствования систем радиолокационного наблюдения предусматривает широкое применение методов моделирования на всех стадиях жизненного цикла: исследовании и разработки методов радиолокационного зондирования, разработка принципов построения аппаратуры и определение требований к подсистемам, сопровождении их экспериментальной отработки, оптимизации методов и алгоритмов обработки радиолокационной информации, обоснование правильности выбираемых технических решений на стадиях аванпроекта, эскизного и технического проектирования, разработки методик измерений и испытаний параметров изготавливаемых технологических и летных комплектов аппаратуры, комплексных испытаний аппаратуры в составе космического аппарата, а также сопровождения летных испытаний для диагностики отказов и деградации параметров летного комплекта с целью корректировки документации и поддержания работоспособности аппаратуры на орбите. Эффективным инструментом при расчете параметров РСА, моделировании преобразований сигналов, алгоритмов синтеза и фильтрации РЛИ, а также для обработки данных испытаний аппаратуры, является программный пакет MATLAB, специально предназначенный для обработки матричных (растровых) данных [155\*, 252, 567].

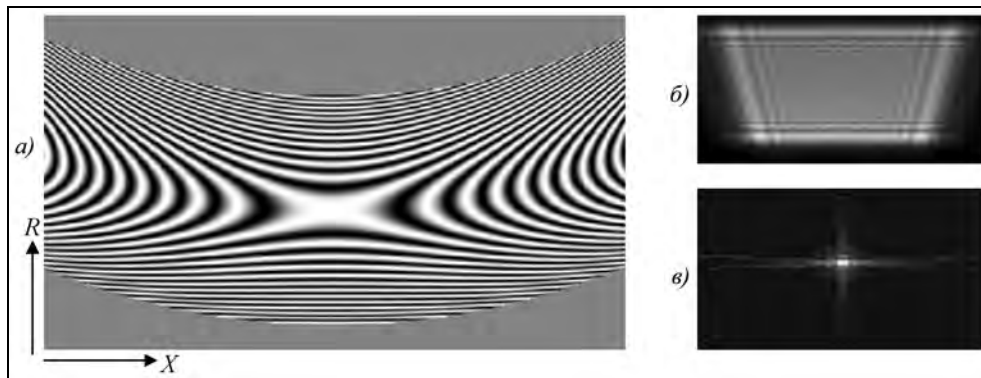
Нормативные документы, регламентирующие порядок разработки космической техники, предусматривают создание стендов полунатурного моделирования для наземной отработки, испытаний и калибровки разрабатываемой аппаратуры в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации. Важнейшую роль в работе таких стендов играют имитаторы внешних устройств управления и информационной поддержки, имитаторы сигналов для разных сечений радиолокационного тракта (от видеочастот до СВЧ), а также средства анализа результатов испытаний, средства протоколирования с диагностикой временной изменчивости параметров аппаратуры.

Концепция проектирования современной радиолокационной аппаратуры предусматривает использование сквозного цифрового управления режимами работы, параметрами блоков и средствами контроля. Это позволяет полностью компьютеризировать работу стендов полунатурного моделирования для аппаратуры в целом и ее подсистем, используя современные высокопроизводительные вычислительные средства, снабженные специализированным программным обеспечением и дополненные соответствующими датчиками, преобразующими физические процессы в

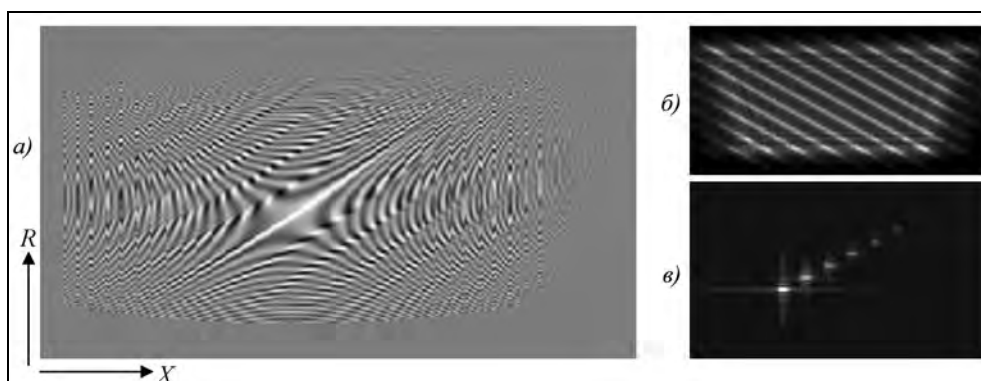


цифровую информацию и формирующие необходимые тестовые сигналы по цифровым командам управления.

Классический метод моделирования состоит в задании входной обстановки в виде одиночной точечной цели или набора точечных целей и расчета радиоголограммы по формулам, учитывающим параметры излучаемого импульса, форму диаграммы направленности и параметры движения РСА. Типичный случай формирования радиоголограммы и синтеза радиолокационного изображения (РЛИ) для случая одиночной точечной цели применительно к РСА с высокой разрешающей способностью и проявлениями миграции сигнала по дальности иллюстрирует рис. 10.1. Влияние миграции дальности приводит к искривлению формы двумерной голограммы (рис. 10.1,*а*), формированию спектра сигнала в виде трапеции (рис. 10.1,*б*) и характерному раздвоению боковых лепестков импульсного отклика (рис. 10.1,*в*). На рис. 10.2 рассмотрен случай формирования последовательности из шести целей с затуханием амплитуд.



**Рис. 10.1.** Действительная составляющая радиоголограммы (*а*), амплитудный спектр выходного сигнала (*б*) и вид выходного отклика (*в*) для одиночной точечной цели



**Рис. 10.2.** Действительная составляющая радиоголограммы (*а*), амплитудный спектр выходного сигнала (*б*) и вид выходного изображения (*в*) для шести точечных целей с затуханием амплитуд

Формирование тестовых радиоголограмм на основе точечного представления исходных сцен имеет ограниченные возможности, не позволяя во всей полноте исследовать интегральное влияние совокупности искажающих факторов (природных, траекторных, связанных с трассой распространения сигнала и аппаратурных искажений) на качество и характеристики выходного информационного продукта. Кроме того, при сложных многоточечных моделях объем потребных вычислений для расчета радиоголограммы может оказаться весьма большим.

Значительно более эффективным для анализа и синтеза систем радиолокационного наблюдения, использующих радиолокаторы с синтезированной апертурой, является развитый в работах [428\*, 431\*, 433\*] метод моделирования процессов преобразования и обработки сигналов в РСА, основанный на математическом обращении последовательности операторов, с помощью которого моделируют исследуемый РСА. Эта процедура может использоваться в полном виде – при переходе от исходного комплексного радиолокационного изображения (КРЛИ) к цифровой радиоголограмме (ЦРГ), а затем – от ЦРГ к результирующему КРЛИ или в частичном виде, используя представление действующих процессов в спектральной области. В последнем случае реализуется преобразование исходного КРЛИ к двумерному спектру ЦРГ и последующее двумерное сжатие спектра ЦРГ с формированием выходного КРЛИ.

В общем виде моделирование комплексного радиолокационного изображения можно рассматривать как результат последовательного применения обратной двумерной свертки (деконволюции) для получения тестовой ЦРГ и прямой двумерной свертки для синтеза КРЛИ

$$S(x, r) = \text{Synt} \{ \text{Hol}(x, r) \} = \text{Synt} \{ \text{Synt}^{-1} \{ S_{\text{et}}(x, r) \} \} \quad (10.1)$$

или в спектральной области

$$F_S(\omega_x, \omega_r) = K_{\text{Synt}}(\omega_x, \omega_r) K_{\text{Hol}}(\omega_x, \omega_r) F_{S_{\text{et}}}(\omega_x, \omega_r), \quad (10.2)$$

где  $S_{\text{et}}(x, r)$  и  $S(x, r)$  – исходные эталонное и получаемое КРЛИ;  $\text{Hol}(x, r)$  – ЦРГ, формируемая по эталонному КРЛИ;  $\text{Synt}$  – процедура синтеза КРЛИ;  $\text{Synt}^{-1}$  – обратная процедура формирования ЦРГ;  $F_{S_{\text{et}}}$  – спектр эталона;  $K_{\text{Hol}}$ ,  $K_{\text{Synt}}$  – частотные характеристики фильтров формирования ЦРГ и синтеза КРЛИ.

При кажущейся тривиальности такого преобразования получение контролируемых результатов для оценки качества конечного продукта требует теоретического обоснования метода с его адаптацией для задач анализа сигналов РСА. Обоснование корректности такого подхода можно провести на идеализированном частном случае ЛЧМ-функций с гауссовой огибающей, который имеет строгое аналитическое решение. Оно рассмотрено в подразделе 6.10.2.

## 10.2. Подготовка исходного материала для моделирования

Исходным материалом для моделирования являются полученные с помощью самолетных или космических РСА комплексные РЛИ, представленные в виде амплитудных (АРЛИ) и фазовых (ФРЛИ) изображений. Для получения контролируемых результатов моделирования входные данные должны быть откорректированы с устранением аппаратурных искажений и приведены к стандартной (нормализиро-

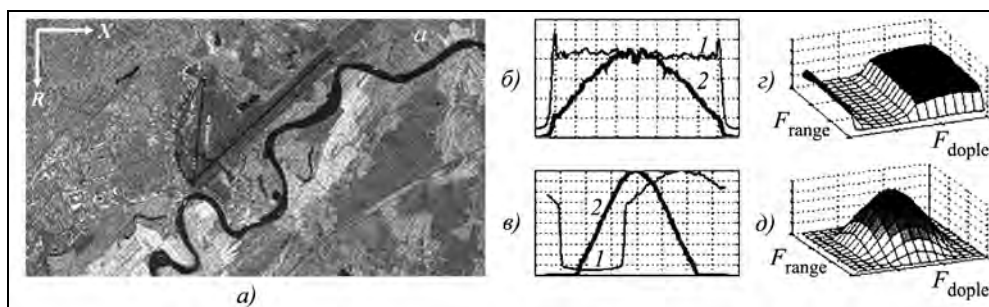
ванной) форме. Это касается амплитудных, спектральных характеристик, уровня неоднозначности и пр.

### Коррекция 2D спектра

Форма спектра ЦРГ по дальности определяется зондирующим импульсом и шумами приемника. Обычно средняя частота спектра по дальности равна нулю, а по азимуту определяется доплеровским смещением, вызванным отклонениями луча антенны от нормали к вектору путевой скорости из-за ошибок ориентации носителя или вращения Земли.

Спектр синтезированного КРЛИ зависит от взвешивающих функций при синтезе и может приобрести смещение по дальности и азимуту в зависимости от используемого алгоритма синтеза. На рис. 10.3 показаны спектры комплексного изображения подмосковного г. Жуковский, полученного в X-диапазоне волн с помощью PCA SIR-C/X-SAR.

Задачи коррекции спектра – центрирование по обеим координатам, обнуление шумов за пределами полезного сигнала, а также двумерная круговая аподизация для устранения артефактов – «крестов» от ярких целей. Вид откорректированных спектров также показан на рис. 10.3, б, в, д.



**Рис. 10.3.** Радиолокационное изображение (а) и его спектры: одномерные по дальности (б) и азимуту (в) (1 – исходные, 2 – скорректированные для моделирования); двумерные: исходный (с), откорректированный (д)

### Ретушь амплитудного изображения

Для ряда задач (оценки влияния нелинейностей тракта, интегральных уровней неоднозначности, боковых лепестков, оценки когерентности при интерферометрической обработке и др.) исходное эталонное изображение должно рассматриваться как результат отражения от фона местности. Поэтому шумы приемника в полосе сигнала, приходящиеся на пиксели фона местности эталонного КРЛИ, будем относить к увеличению  $\sigma^0$  фона на величину  $\sigma_{\text{не}}^0$  шумового эквивалента РСА и интегрального уровня неоднозначности.

Изображения неотражающей поверхности (спокойная водная поверхность, асфальтовые дороги и т.п.) должны быть ретушированы с обнулением амплитуды. Это легко реализуется с помощью стандартных пакетов обработки изображений

Paint, Photoshop, если АРЛИ преобразовать в 8- или 16-битный форматы RAW или TIF или 8-битный формат BMP и применить пороговую обработку. Заметим, что при работе с Photoshop не допускается преобразование типов RGB или Index в Grayscale, так как это меняет гистограмму распределения значений (особенно заметно для ФРЛИ). Для контроля коэффициента передачи тракта обработки в эталонное АРЛИ до его нормализации можно добавить набор имитированных точечных целей с калиброванными уровнями.

Для отработки алгоритмов синтеза изображения с автофокусировкой в проекторном режиме с получением метрового разрешения можно использовать эталонные КРЛИ грубого разрешения с их масштабным преобразованием до требуемого шага. Такие КРЛИ можно интерпретировать как результаты радиолокационной съемки уменьшенных макетов местности.

Для моделирования обработки сигналов с селекцией движущихся целей (СДЦ) предложено исходное КРЛИ разделить на два или несколько слоев – неподвижная местность с «лысыми местами» от подвижных объектов и сами подвижные объекты с формированием входных данных для синтеза КРЛИ по разным алгоритмам с последующим суммированием сигналов и добавлением шумов, имитирующих шумы приемника.

При отсутствии КРЛИ можно воспользоваться и амплитудным изображением (АРЛИ). Фаза задается случайной матрицей со спектром, соответствующим параметрам моделируемой РСА. Имеющиеся на РЛИ артефакты, вызванные яркими целями, устраняются ретушью.

### Расщепление отсчетов в пикселе КРЛИ

Случайная амплитуда сигнала в каждом пикселе РЛИ определяется интерференцией сигналов, отраженных от отражателей в данном элементе разрешения. При моделировании интерферометрической обработки возникает необходимость учета малых перемещений отражателей в пределах элемента разрешения. Исходя из принципа Гюйгенса, можно считать, что элементарные отражатели формируют равные по амплитуде отраженные сигналы. Суммарный отраженный в сторону РЛС сигнал определится векторной суммой отдельных сигналов с учетом фазы, определяемой положениями отражателей. Для моделирования таких эффектов представим КРЛИ как сумму по крайней мере двух КРЛИ с постоянными амплитудами  $A_0$  и координатами отражателей, обеспечивающими при суммировании сигнал с амплитудой и фазой, совпадающей с исходным КРЛИ. Предполагаем, что масштаб КРЛИ по дальности  $M_R$  кратен длине волны. Если это не может быть соблюдено, КРЛИ интерполируют на частоту квантования, кратную частоте излучения. Для интерполяции можно применить процедуру масштабирования, приведенную в подразделе 6.5.3. Координаты отражателей относительно центра  $n$ -го пикселя с наклонной дальностью  $R_n$  вычисляются по формулам

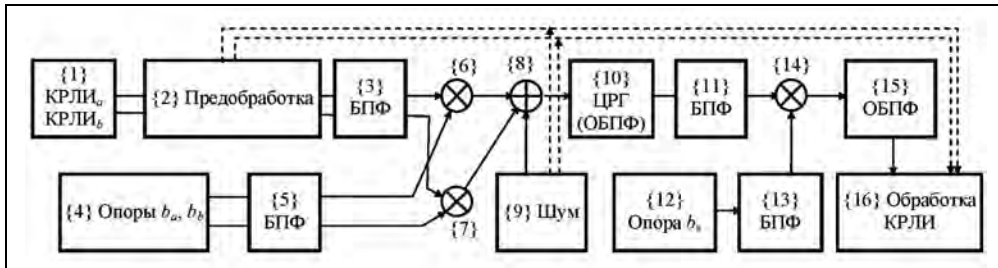
$$\begin{aligned} R_{1n} &= R_n - dr_0 - dr_{An} - dr_{\varphi n}; \\ R_{2n} &= R_n + dr_0 + dr_{An} - dr_{\varphi n}, \end{aligned} \quad (10.3)$$

где  $dr_0 = \frac{M_R}{8} - \frac{\lambda}{8}$  – половина начального расстояния между отражателями применительно к гладкой поверхности с нулевым отражением;  $dr_{\varphi_n} = \frac{\varphi_n}{K_x}$  – поправка по фазе в пикселе, соответствующая изменению наклонной дальности;  $dr_{A_n} = \frac{\arcsin(A_n/2A_0)}{K_x}$  – поправка, определяющая амплитуду отраженного сигнала. Здесь  $K_x = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число;  $A_n$  и  $\varphi_n$  – амплитуда и фаза сигнала в пикселе;  $A_0$  – заданная амплитуда сигнала от отдельного отражателя, превышающая максимальную амплитуду РЛИ.

### 10.3. Моделирование обработки сигналов в РСА

Обобщенная структурная схема моделирования приведена на рис. 10.4. В ее состав входят:

- исходное КРЛИ {1} или несколько образцов (слоев) КРЛИ для формирования суммарной сцены, например, при моделировании движущихся целей;
- предобработка {2}, включающая устранение артефактов на КРЛИ, выделение обстановки для каждого слоя КРЛИ;
- вычисление спектров парциальных КРЛИ {3} и опорных функций {4}–{5} для каждого слоя (операция БПФ);
- перемножение спектров парциальных КРЛИ и опорных функций ({6} и {7});
- суммирование парциальных спектров радиоголограмм {8} и добавление шумов {9}, имитирующих шумы приемника;
- формирование суммарной цифровой радиоголограммы (ЦРГ) {10} путем обратного преобразования Фурье (ОБПФ);
- далее следуют стандартные операции синтеза комплексного радиолокационного изображения {11}–{15} и обработка выходного КРЛИ {16}. В простейшем случае, если эффекты миграции дальности не моделируются и можно пренебречь зависимостью опорной функций синтеза КРЛИ от наклонной дальности, можно выполнить операцию быстрой свертки с применением двумерных преобразований Фурье – прямого БПФ и обратного ОБПФ.



**Рис. 10.4.** Структурная схема моделирования обработки сигналов в РСА

Такой вариант моделирования применим при теоретическом анализе явлений, связанных с разработкой новых алгоритмов обработки, анализе влияния разных искажающих воздействий и поиске методов их устранения, а также при наземной обработке реальной аппаратуры в составе стендов полунатурного моделирования. Искажающие воздействия, связанные с прохождением радиолокационных сигналов через тракт РСА, включая преобразование из аналоговой формы сигнала в цифровую, вводят в разрыв звеньев {10}–{11} структурной схемы модели.

Более сложные алгоритмы синтеза КРЛИ, включающие миграцию, реальные зависимости опорной функции от наклонной дальности, смещение по доплеровской частоте требуют модификации процедур обработки ЦРГ (звенья {11}–{16}) и соответствующей корректировки процедур формирования ЦРГ (звенья {1}–{8}).

Изложенный подход к моделированию процессов в РСА был успешно применен при анализе алгоритмов обнаружения движущихся целей, исследовании методов формирования изображения в видеоимпульсном РСА (ВИРСА), приведенном в разделе 6.12, при разработке алгоритма синтеза радиолокационного сигнала в прожекторном режиме, а также при моделировании интерферометрической обработки пары КРЛИ в целях интерпретации результатов радиолокационной съемки.

#### **10.4. Моделирование интерферометрической обработки изображений**

При моделировании интерферометрической обработки пары КРЛИ исходный эталон используют как первичное КРЛИ<sub>а</sub> в координатах наклонная дальность – азимут. Наклонные дальности вторичного КРЛИ<sub>б</sub> пересчитывают с учетом задаваемой высоты рельефа  $h$

$$R_b = \sqrt{R_{sb}^2 + (R_e + h)^2 - 2R_{sb}(R_e + h)\cos(y_a + y_{ab})}, \quad (10.4)$$

где  $R_e$  – радиус Земли;  $R_{sa}$  и  $R_{sb}$  – радиусы орбит КА;  $y_{ab}$  – угол между радиус-векторами космических аппаратов на траверзе;  $y_a = \arccos \left\{ \frac{R_{sa}^2 + R_{eh}^2 - R_a^2}{2R_{sa}R_{eh}} \right\}$  – угловое положение визируемой точки относительно следов вторичного и первичного КА.

Для задачи оценки качества интерферометрии ряд операций совмещения двух КРЛИ можно опустить (пунктир на рис. 10.4). Для учета флуктуаций фона местности исходное разрешение эталона следует задавать в 2–4 раза лучше расчетного с последующим усреднением соседних пикселей.

Результаты проведенного моделирования для высот орбиты 500 км при длине волны РСА 9,6 см, базе интерферометрии 200 м, отношении сигнал/шум – 10 дБ, плановых разрешениях: РЛИ – 2,5 м, карты рельефа – 20 м, СКО высот на равнине, измеренное по выходу обработки, составило  $\sigma_h=1,4$  м.

## 10.5. Моделирование индикации движущихся целей

При радиолокационном наблюдении движущихся целей (ДЦ) проявляются разные эффекты в зависимости от угла между вектором скорости и вектором визирования по наклонной дальности. В общем случае мы имеем комбинацию эффектов, связанных с радиальной скоростью (проекцией вектора скорости на линию визирования), которые приводят к смещению доплеровской частоты сигнала от цели и миграцию дальности и тангенциальной составляющей скорости, которая складывается или вычитается из скорости носителя РСА и вызывает расфокусировку изображения ДЦ.

Применительно к космическим РСА известны различные методы индикации ДЦ по радиальной составляющей скорости, основанные на интерферометрии вдоль линии пути с использованием разделенных антенн типа АФАР или тандем из пары спутников с РСА, двигающихся по близким орбитам со смещением по времени [317, 370, 515]. Предложен также пригодный для РСА с зеркальными антеннами метод пространственно-временной фильтрации сигнала, создающий виртуальное смещение фазового центра излучения и приема сигналов [37\*, 161\*, 428\*].

Индикация ДЦ по тангенциальной составляющей скорости использует эффекты изменения амплитуд сигналов от ДЦ, вызванные дефокусировкой РЛИ при синтезе РЛИ с разными опорными функциями.

Для моделирования методов индикации ДЦ по схеме, показанной на рис. 10.4, сигналы от местности формируют в одном слое КРЛИ и преобразуют в ЦРГ по опорной функции для неподвижной местности, а КРЛИ для ДЦ с радиальными и тангенциальными составляющими формируют в другом слое (или других слоях) КРЛИ, в которых формируют парциальные ЦРГ с соответствующими опорными функциями.

## 10.6. Структура математической модели сквозного тракта РСА

В математическую модель сквозного тракта РСА входят три основных модуля:

- 1) формирования голограммы по комплексному изображению;
- 2) синтеза эталонного изображения;
- 3) синтеза рабочего изображения с возможностью введения искажающих воздействий.

В качестве примера исходного материала использовано комплексное РЛИ (КРЛИ), полученное с помощью самолетного РСА  $X$ -диапазона волн с разрешающей способностью около 1,5 м (см. рис. 10.5). Для сокращения объема вычислений размер исходного кадра ограничен матрицами  $1024 \times 1024$  пикселей для записи амплитуды и фазы. Исходный материал представлен двумя модификациями КРЛИ (см. рис. 10.6): эталонного КРЛИ, в котором выделен ряд площадок для размещения тест-целей. На этих площадках амплитуда РЛИ обнулена. Во второй модификации исходного КРЛИ на выбранных площадках помещены миры с тест-целями: шесть целей по диагонали дальность – азимут: от номинальной ЭПР (№ 1) с убыванием через 3 дБ (№2–6) и яркий маркер (№7).

Вид выходного рабочего РЛИ, полученного в результате синтеза с расчетным уровнем шумов, приведен на рис. 10.7.

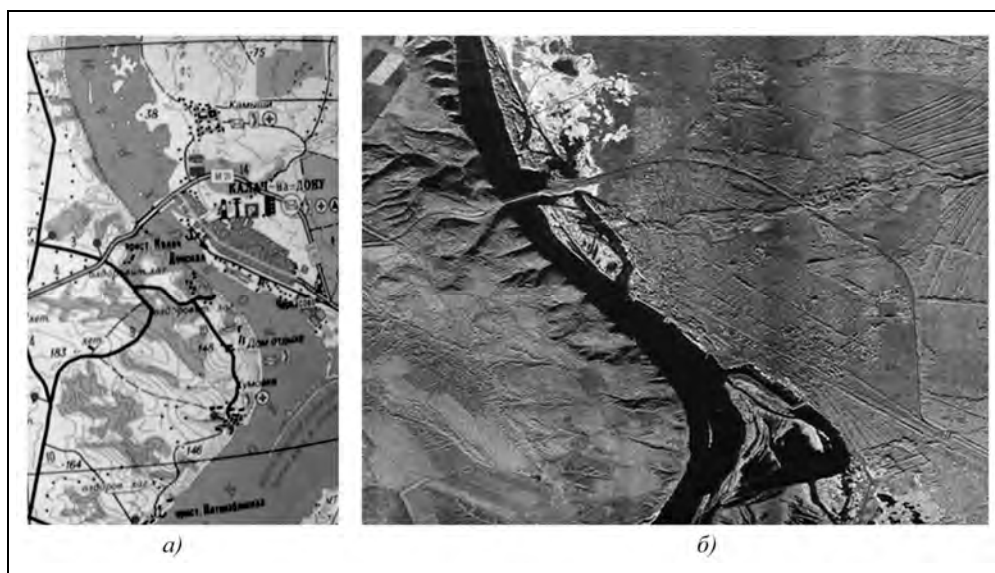


Рис. 10.5. Карта района съемки (а) и амплитуда комплексного изображения участка местности (б), полученного с помощью РСА X-диапазона волн и используемого для моделирования процессов в РСА

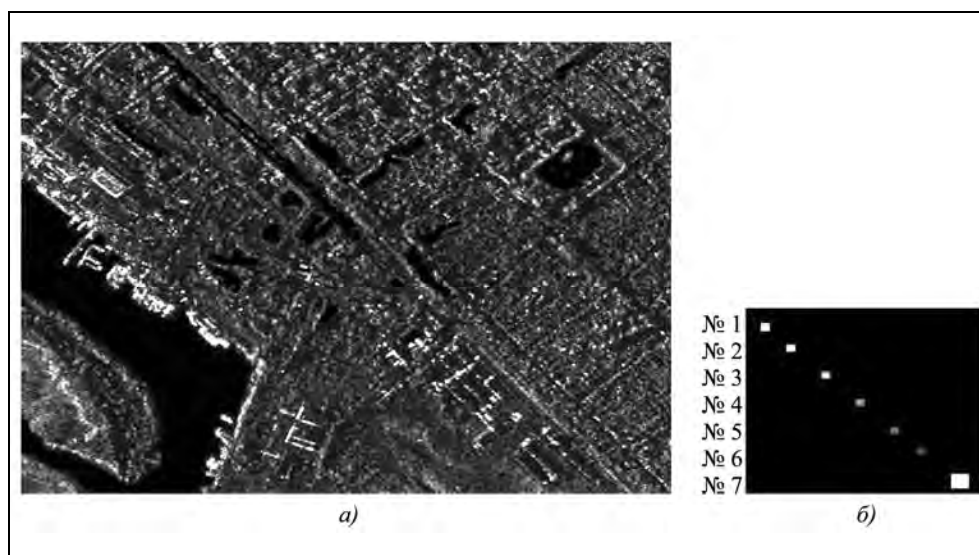
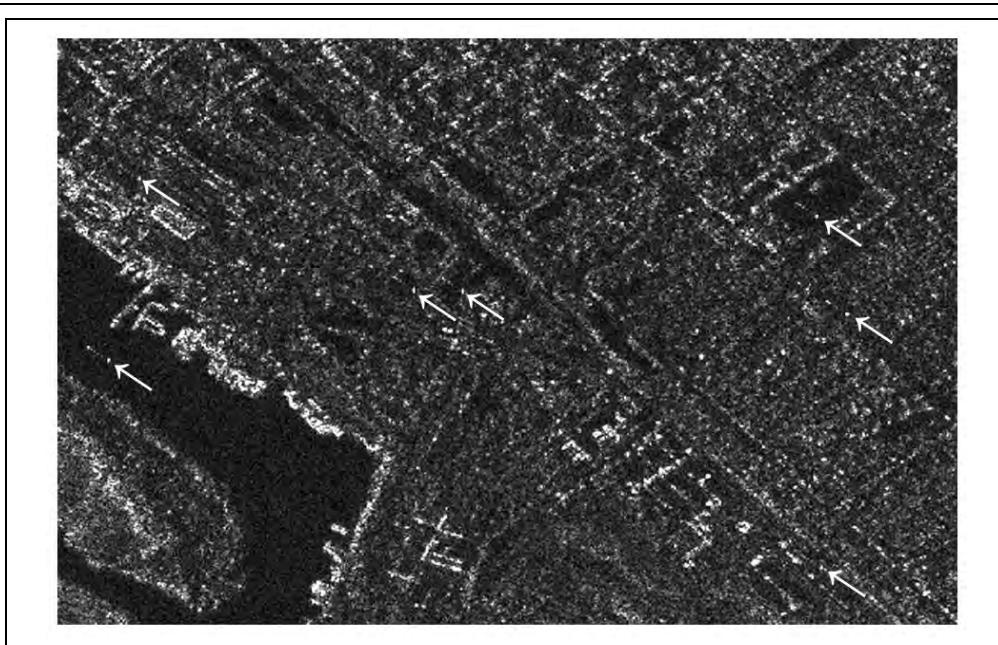
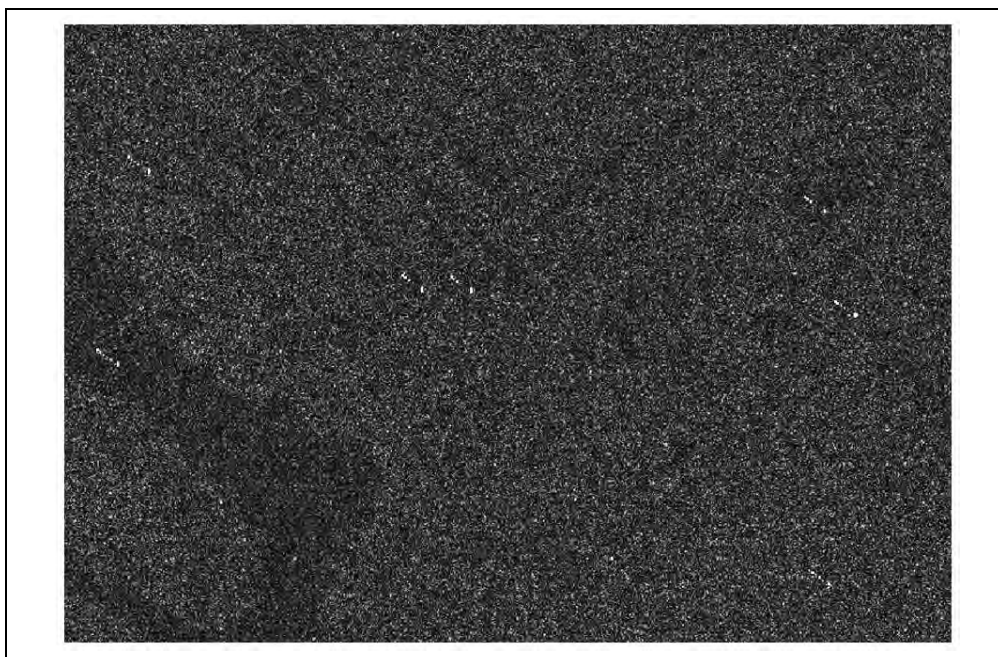


Рис. 10.6. Увеличенный фрагмент исходного кадра для моделирования с обнуленной амплитудой на водной поверхности и асфальтовых площадках (а), тестовая мира (б)





**Рис. 10.7.** Результат синтеза радиоголограммы, сформированной по исходному КРЛИ  
(стрелками отмечены положения тест-целей)



**Рис. 10.8.** Разностное РЛИ (рабочее РЛИ с тест-целями минус эталонное РЛИ)  
(шумы на обоих РЛИ некоррелированы)

Кроме визуального сравнения эталонного и рабочего изображений возможно применение известной технологии выявления изменений в оперативной обстановке Change Detection путем получения разности рабочего и эталонного РЛИ. Разностное РЛИ приведено на рис. 10.8. Фоновая засветка определяется разностью двух некоррелированных шумовых процессов, имитирующих шумы приемника.

Далее проводят моделирование по схеме, приведенной на рис. 10.4, с вводом искажающих воздействий и получением образцов КРЛИ. Оценивают параметры КРЛИ по методикам, приведенным в разделе 11.1, а также проводят их сравнение с эталонными РЛИ.

Проведение математического моделирования с использованием рассмотренного подхода или по другим методикам позволяет получать информацию, необходимую для разработки РСА, а также для оценки результатов дистанционного зондирования.

### **10.7. Полунатурное моделирование при отработке и испытаниях аппаратуры РСА**

Изложенная методика моделирования преобразований сигналов в тракте РСА и ее фрагменты могут быть эффективно использованы в комплексных стендах полунатурного моделирования (стенд главного конструктора РСА, комплексный стенд отработки КА и др.), предназначенных для наземной отработки и сопровождения эксплуатации РСА космического базирования. Использование такого стенда обеспечивает возможность анализа неисправностей или причин деградации характеристик, возникающих в полете, их диагностики методом моделирования, поиска путей сохранения живучести аппаратуры, а также получения необходимых данных для корректировки документации на последующие образцы аппаратуры или ее модернизации.

На стенде полунатурного моделирования возможно проведение испытаний комплекса РСА по программе, максимально приближающейся к программе натуральных испытаний аппаратуры в полете. В наземных условиях отрабатываются методики оценки характеристик РСА, оценивается временная стабильность параметров аппаратуры (фазовых характеристик, коэффициентов усиления каналов, уровней квантования АЦП и др.), включая температурные воздействия, изменения напряжения питания. Отрабатываются процедуры учета телеметрических данных, информации координатной поддержки, датчиков ориентации КА с программным модулем коррекции аппаратурных искажений, предшествующих синтезу РЛИ.

Этап комплексной отработки РСА на стенде полунатурного моделирования позволяет резко сократить цикл подготовки к эксплуатации после запуска РСА на орбиту. Стенд должен иметь в своем составе набор преобразователей цифровой информации в аналоговые сигналы (ЦАП, по типу однополосных модуляторов) на несущей частоте РСА, промежуточной частоте и для испытаний видеотракта. С помощью входных данных для ЦАП должны быть подготовлены заранее модели процессов, действующих в разных сечениях тракта РСА, созданные на фрагментах фоноцелевой обстановки, соответствующей задачам, решаемым разрабатываемой аппаратурой РЛН.

В цикл отработки аппаратуры РСА в *составе стенда полунатурного моделирования* должны входить:

- отработка и тестирование методик оценки сквозных характеристик РСА;
- отработка и тестирование методик внутренней и внешней калибровки РСА (см. гл. 11);
- проведение проверочных испытаний РСА по специальным расширенным программам и в экспериментальных режимах;
- отработка циклограмм оперативного комплексного контроля РСА для архивирования изменчивости параметров, входящих в изделие блоков в течение жизненного цикла;
- формирование тестовых цифровых радиолограмм (ЦРГ) для проверки программного обеспечения бортовой и наземной обработки информации;
- сопровождение работы РСА в полете, моделирование нештатных ситуаций и выработка мер по восстановлению работоспособности РСА;
- отработка методик и алгоритмов коррекции искажений РЛ-информации, вызванных аппаратурными факторами и погрешностями измерения баллистических параметров;
- оценка качества принимаемой радиолокационной информации и конечного продукта.

В последние годы появилось большое число зарубежных публикаций (в частности, в Трудах конференции EUSAR'2006 [287, 288, 336, 384]), посвященных вопросам обеспечения заданных параметров РСА и анализу их стабильности в процессе эксплуатации существующих систем Radarsat-1, Envisat-1 и др. Приводятся результаты измерений сквозных параметров тракта РСА, определяющих качество изображения. Отмечается, что благодаря тщательной наземной отработке предварительная стадия подготовки аппаратуры TerraSAR-X к штатной эксплуатации после ее вывода на орбиту оказалась значительно меньше ожидаемой. Первое из полученных изображений (см. рис. 2.5) вполне соответствовало предъявляемым к РЛИ общим требованиям.

Приведенные данные свидетельствуют о широких возможностях применения математического моделирования процессов преобразования сигналов в РСА при проектировании РСА, в процессе создания аппаратуры и ее эксплуатации, тестирования и калибровки аппаратуры, а также для разработки методик тематической обработки получаемой радиолокационной информации и ее интерпретации.

---

## Глава 11

### КАЛИБРОВКА РСА

#### 11.1. Методики оценки характеристик информационных продуктов РСА

##### 11.1.1. Типы информационных продуктов

Объективная оценка результатов радиолокационной съемки является неотъемлемым элементом проведения радиолокационной съемки и формирования радиолокационных изображений в условиях наличия разных дестабилизирующих факторов – ограничений, заложенных при проектировании аппаратуры (неоднозначности сигнала, нелинейности тракта и др.), аппаратурных нестабильностей, погрешностей траекторных измерений, неоднородностей характеристик трассы распространения сигнала. Влияние этих факторов подробно исследовано в литературе по РСА.

Методики оценки стандартизированы в документации Международного комитета по спутникам дистанционного зондирования Земли CEOS (Committee on Earth Observation Satellites). Аналогичные методики используют при испытаниях разработанной аппаратуры, чтобы подтвердить правильность заложенных технических решений.

Эти стандарты определяют типы поставляемых информационных продуктов, форматы данных, состав и содержание сопроводительной служебной информации. Соблюдение фирмами-распространителями радиолокационной информации этих стандартов обеспечивает простоту использования информации потребителями, возможность широкого обмена данными и совместную тематическую обработку информации, полученной разными датчиками.

По мере совершенствования космических РСА меняется вид поставляемых информационных продуктов и их форматы. Наиболее свежие данные содержатся в документации по РСА PALSAR и TerraSAR-X [534, 557, 558, 572–574].

Эти документы оговаривают базовые типы и форматы поставляемых информационных продуктов. Типы продуктов соответствуют режимам работы (маршрутный, Скансар с одной, двумя, четырьмя поляризациями, прожекторный). Можно получать РЛИ с улучшенным пространственным разрешением (resolution enhanced) за счет специального взвешивания (апертурной коррекции) или улучшенные по радиометрическому разрешению (radiometrically enhanced) после некогерентного накопления (5–7 наблюдений) и последующего прореживания. Это обеспечивает радиометрическое разрешение около 1,5 дБ. Самостоятельным продуктом являются сглаженные РЛИ с большим числом наблюдений (MGD – Multi Look Ground Range Detected).

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

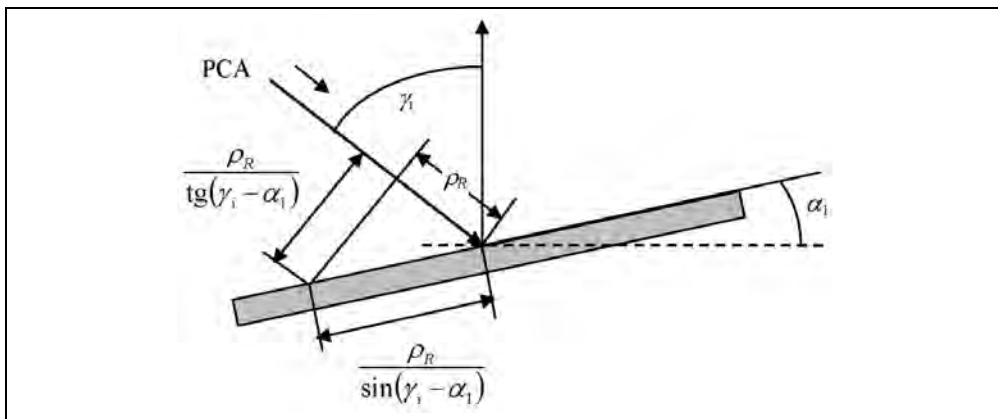
Как правило, РЛИ поставляются с равным разрешением по обеим координатам, запас используется для подавления спекл-шума. Основным продуктом являются амплитудные РЛИ в 16-битном формате GeoTIFF.

Возможна поставка комплексных изображений (КРЛИ) типа SSC (Single Look Slant Range Complex) в виде прямоугольной матрицы 16-битных отсчетов (целое со знаком) с действительной и мнимой составляющими. Первые строки матрицы и начальные отсчеты каждой строки используют для служебной информации кадра. Кроме РЛИ возможна также поставка радиолограмм (Raw Data) в форматах, пригодных для ввода в компьютер.

Для получения РЛИ, обладающих измерительными свойствами, в процессоре обработки выполняется компенсация искажающих воздействий: учет формы угломестной ДНА, различий разрешающей способности вдоль и поперек линии пути, изменений коэффициента усиления приемника и излучаемой мощности. Среднеквадратическая погрешность радиометрической калибровки материалов PCA TerraSAR-X не более 1,2 дБ (абсолютная) и 0,3 дБ (относительная). Изображения приводятся к радиолокационной яркости  $\beta^0$  [450, 526, 572]. Этот параметр (beta pought) отличается от использованных ранее параметров: коэффициента рассеяния (УЭПР)  $\sigma^0$  или «показателя рассеяния»  $\gamma$  (см. гл. 2) тем, что они характеризуют радиофизические свойства облучаемой поверхности с учетом фактического значения угла падения. Параметр  $\beta^0$  – радиолокационная яркость более подходит к описанию РЛИ, в которых фактические значения уклонов местности могут быть неизвестны. Связь параметров  $\sigma^0$ ,  $\gamma$  и  $\beta^0$  в зависимости от геометрии облучения (рис. 11.1) определяется формулой

$$\sigma^0 = \gamma \sin(\gamma_i - \alpha_1) = \beta^0 \sin \gamma_i, \quad (11.1)$$

где  $\gamma_i$  – угол падения относительно местной вертикали;  $\alpha_1$  – уклон наблюдаемой поверхности относительно местной горизонтали в плоскости визирования по углу места.



**Рис. 11.1.** Проекция приращения дальности как функция локального угла падения, который равен разности угла падения и склона поверхности относительно горизонтали в плоскости визирования по углу места

Значения  $\sigma^0$  вычисляют по формуле

$$\sigma^0 = \left( k_s \langle \text{DN} \rangle^2 - \text{NEBN} \right) \sin \gamma_i, \quad (11.2)$$

где DN – цифровой отсчет энергетического РЛИ;  $k_s$  – множитель пропорциональности, указываемый в служебной информации;  $\gamma_i$  – угол падения;  $\text{NEBN} = \beta_{\text{не}}^0$  – радиолокационная яркость шумового эквивалента, записанная в служебной информации и не зависящая от локального угла склона местности

$$\text{NESZ} = \text{NEBN} \sin \gamma_i. \quad (11.3)$$

Значения NEBN в виде полиномов от наклонной дальности приводятся в служебной информации к РЛИ.

Выходной информационный продукт в зависимости от степени обработки поставляют в виде амплитудных РЛИ в координатах наклонная дальность – азимут, привязанные к географическим координатам (Georeference Data) или в виде геокодированных РЛИ (Geocoded Data) в меркаторской или полярной стереографической проекциях. Каждый пиксель РЛИ по азимуту соответствует нулю доплеровской частоты.

Комплексные изображения SSC (Single Look Slant Range Complex), одно наблюдение имеет координаты наклонная дальность – азимут. Обычно его представляют в формате uint16 с чередованием строк, содержащих действительную и мнимую составляющие КРЛИ.

Погрешность географической привязки РЛИ TerraSAR-X в зависимости от уровня обработки составляет около 700 м (вдоль линии пути) для экстренных данных в режиме, близком к реальному времени, 2...4 м (СКО) – для стандартного продукта высокого разрешения и 20 см (СКО) – для интерферометрической обработки. Геокодированные РЛИ дополняются картографической основой GPS (эллипсоид WGS-84). Обеспечивается совместимость материалов, полученных от РСА TerraSAR-X, ERS-1/2, ENVISAT/ASAR, RADARSAT, X-SAR/SIRC, PALSAR.

Поляриметрические РЛИ поставляются с одной поляризацией (ГГ или ВВ), двумя поляризациями (ВВ+ВГ или ГГ+ГВ, или парными ВВ+ГГ), а также с четырьмя поляризациями (ВВ+ВГ+ГГ+ГВ).

Основные параметры РЛИ – это пространственное и радиометрическое разрешение, чувствительность РСА (NEBZ или NESZ), максимальный и интегральный уровни боковых лепестков импульсного отклика РСА, относительный уровень азимутальной неоднозначности.

### 11.1.2. Оценка пространственного разрешения

Объективная оценка получаемых информационных продуктов является важным аспектом системного подхода к проектированию современных РСА космического базирования. Необходимость такой оценки вытекает из современных требований, предъявляемых потребителями радиолокационной информации для решения практических задач ДЗЗ.

Для оценки пространственного разрешения широко применяемый для испытаний самолетных РЛС критерий Рэлея по провалу в реакции системы на парные

точечные цели является малоэффективным из-за сложности набора большой статистики для усреднения случайной фазы интерференции, что при работе на КА требует большого количества измерительных мир либо длительного времени испытаний. Значительно большую точность дает оценка технического параметра РСА – ширины импульсного отклика на точечную цель.

Согласно мировой практике и, в частности, по методикам «Договора по открытому небу» для оценки разрешающей способности РСА проводят съемку полигонов, оборудованных измерительными мирами из уголковых отражателей (точечных целей) или используют транспондеры [81, 220, 236\*]. Для космических РСА периодичность съемки, зависящая от параметров орбиты и реализуемой полосы обзора, обычно составляет несколько суток. Поэтому в дополнение к измерениям радиолокационных снимков тестовых полигонов желательно иметь средства оценки разрешающей способности непосредственно по материалам текущей радиолокационной съемки, что существенно повысит оперативность контроля характеристик РСА.

Попытки измерить пространственное разрешение РСА по автокорреляционной функции изображения не позволяют учесть расфокусировку ЛЧМ-процессов по азимуту или дальности. Более продуктивна оценка разрешения по протяженным линейным объектам – просекам, шоссе, рулежным дорожкам и ВПП аэродромов [152\*]. Перспективно применение для этой цели метода локального автофокуса РЛИ, рассмотренного в подразделе 6.10.8 [434\*].

Для оценки разрешающей способности РСА используют импульсные отклики от точечных целей на амплитудных РЛИ. Пример РЛИ с уголковой мирой приведен на рис. 11.2. При получении РЛИ необходимо принимать меры, чтобы отметки от отражателей не попадали в область ограничения, что бывает при регистрации РЛИ с разрядностью 8 бит. Отношение сигнал/шум+фон на РЛИ должно быть не менее 17 дБ. Измерения можно проводить по АРЛИ с одним или несколькими наблюдениями. Используют фрагмент АРЛИ в квадрате 16×16 пикселей по наклонной дальности и азимуту, в центре которого находится отметка от уголкового отражателя. Выполняют интерполяцию фрагмента методом «раздвижки спектра» (подраздел 6.5.3) с увеличением размера фрагмента в 16 раз до 256×256 пикселей. Находят точку максимума интерполированного амплитудного отклика и строят графики сечений амплитуды по наклонной дальности и азимуту.

Для каждого из интерполированных импульсных откликов вычисляют отсчетный уровень для измерения его ширины. Он равен квадратному корню из половины средней мощности сигнала от цели плюс мощность фона и шумов

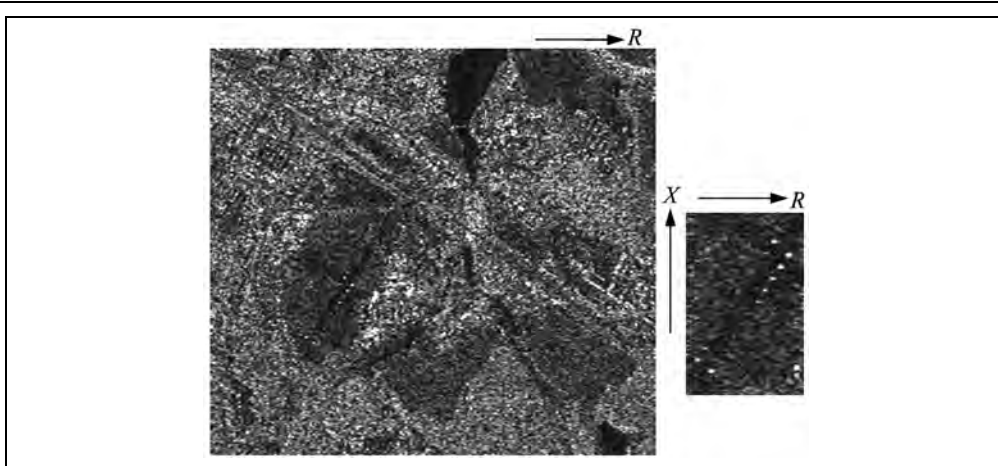
$$A_{izm} = \sqrt{(A_{max}^2 + A_{min}^2)/2}, \quad (11.4)$$

где  $A_{max}$  – максимальная амплитуда отклика;  $A_{min}$  – средний уровень окружающего фона и шумов вдали от максимума (рис. 11.3).

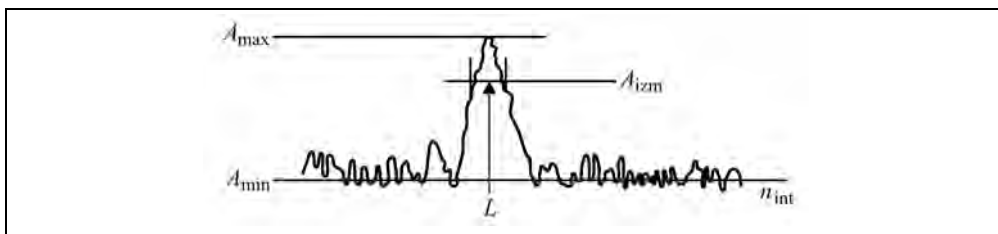
Проверяют, что мощность сигнала от отражателя превышает мощность фона и шумов в элементе разрешения РСА не менее, чем на 17 дБ, т.е.

$$A_{max}^2 / A_{min}^2 \geq 50. \quad (11.5)$$

## Глава 11. Калибровка РСА



**Рис. 11.1.** РЛИ и его фрагмент с уголковыми отражателями; максимальная ЭПР отражателя  $\sim 1024 \text{ м}^2$  для  $\lambda=9,6 \text{ см}$ , шаг изменения ЭПР 3 дБ (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1», виток 1038н, 04.06.1992)



**Рис. 11.3.** Измерение пространственного разрешения РСА по импульсному отклику

Измеряют ширину сечений отклика в пикселях  $L_R$  и  $L_X$  по уровню 0,707 от максимума амплитуды, после чего вычисляют разрешающую способность РСА путем умножения измеренных значений ширины отклика на масштабы РЛИ  $M_R$  и  $M_X$ , деленные на 16

$$\rho_R = L_R M_R / 16 ; \quad (11.6)$$

$$\rho_X = L_X M_X / 16 .$$

Разрешение по поперечной дальности на местности вычисляют через разрешение по наклонной дальности и угол падения  $\gamma_i$ :

$$\rho_Y = \rho_R / \sin \gamma_i . \quad (11.7)$$

Проводят усреднение результатов оценки разрешения по имеющимся откликам от точечных целей. При выборе отметок на снимке для проведения измерений можно воспользоваться методикой оценки «точечности» целей, приведенной в подразделе 6.10.7.

Приближенную оценку разрешения без интерполяции отсчетов можно получить, если аппроксимировать передаточную функцию колоколообразной кривой



$$H(z) = \exp(-2bz^2/\rho_z^2), \quad (11.8)$$

где  $\rho_z$  – разрешение по соответствующей координате в пикселях на уровне половинной мощности;  $b = 2 \ln 2$ .

На РЛИ (рис. 11.4, а) берут максимальный отсчет  $A_0$  – амплитуда (или  $E_0$  – отсчет ЭРЛИ) и соседние к нему два отсчета  $A_1$  и  $A_2$  ( $E_1$  и  $E_2$ ) и рассчитывают разрешающую способность в координатах РЛИ

$$\rho_z = \sqrt{\frac{4 \ln 2}{\ln(A_0/A_1 A_2)}} = \sqrt{\frac{8 \ln 2}{\ln(E_0/E_1 E_2)}}. \quad (11.9)$$

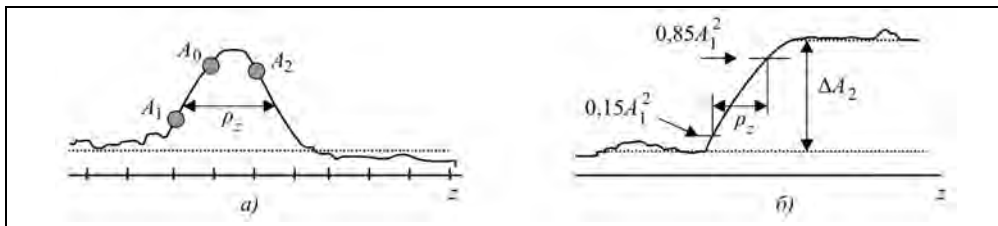


Рис. 11.4. Измерение пространственного разрешения РСА по точечным целям (а) и границе участков с разной УЭПР (б)

Линейное разрешение на местности вычисляют подстановкой вместо  $\rho_z$  измеренных по снимку разрешений по азимуту  $\rho_x$  и дальности  $\rho_y$  с учетом масштабов РЛИ по координатам

$$\rho_x = M_x \rho_z; \quad \rho_y = M_y \rho_z. \quad (11.10)$$

Линейное разрешение РСА по «резкости границы» целесообразно оценивать по интервалу между уровнями 0,1 и 0,85 при изображении границы участков с разной УЭПР. Оценка разрешения по резкости границы актуальна для текущей аттестации информационного продукта самолетных РСА, длинноволновых ( $\lambda > 50$  см) и коротковолновых ( $\lambda < 3$  см) космических РСА с автофокусировкой, применяемой с целью компенсации фазовых (траекторных и атмосферных) флуктуаций по синтезируемой апертуре.

После выбора фрагмента делают интерполяцию и поворот РЛИ таким образом, чтобы граница была направлена вдоль строки (для поворота используют типовые программы в среде Windows) и далее снимают переходную функцию, усредняя (по мощности) отсчеты вдоль границы. Для колоколообразной передаточной функции переходная функция является интегралом вероятности и разрешение по уровню минус 3 дБ численно равно расстоянию между уровнями 0,15 и 0,85 переходной функции (рис. 11.4, б), умноженному на масштабы РЛИ.

### 11.1.3. Вычисление импульсного отклика РСА по получаемым снимкам

Особенностью космических РСА является большой интервал повторной съемки заданных районов, обычно составляющий несколько суток. Это не позволяет вести оперативный контроль технических характеристик выходных продуктов и основного параметра – формы импульсного отклика РСА, определяющего простран-

## Глава 11. Калибровка РСА

венное разрешение и уровень боковых лепестков. Используя элементы алгоритма PGA, можно получать оценку разрешения РСА непосредственно по анализируемому снимку и существенно повысить оперативность тестирования РСА [434\*, 490].

Для точно сфокусированного РЛИ импульсный отклик однозначно определяется обратным преобразованием Фурье от амплитуды спектра РЛИ. Остаточные ошибки фокусирования РЛИ по азимуту и дальности, приводящие к деформации отклика, могут быть измерены в спектральной области по алгоритмам PGA, после чего можно получить усредненный по снимку импульсный отклик (применением ОБПФ) и измерить его параметры.

Операции по получению импульсного отклика выполняют в следующей последовательности:

- 1) интерполируют исходное комплексное изображение или его фрагмент в 4–8 раз (можно по одной координате), используя БПФ, раздвижку спектра и ОБПФ;
- 2) в каждой строке по азимуту выделяют отметку от яркой цели, превышающую заданный порог;
- 3) выполняют БПФ и смещают спектр отметки к нулю;
- 4) устраняют неоднозначность фазы;
- 5) усредняют фазы спектров по всем строкам с отметками;
- 6) вычисляют амплитудный спектр по всему изображению;
- 7) умножают амплитудный спектр на усредненный фазовый множитель;
- 8) выполняют ОБПФ.

В соответствии с известными методиками измеряют параметры сечения импульсного отклика по данной координате, после чего исходное КРЛИ транспонируют и повторяют все процедуры для измерения отклика по второй координате.

На рис. 11.5 приведен вид измеренных импульсного отклика и фазовых характеристик спектра отклика до применения PGA (пунктир) и при точной фокусировке (сплошные линии). По оси абсцисс отложены относительные отсчеты интерполированного изображения и спектра. Вблизи нулевой доплеровской частоты при точной фокусировке виден плоский участок фазовой характеристики, а при расфокусировке видна параболическая кривая.

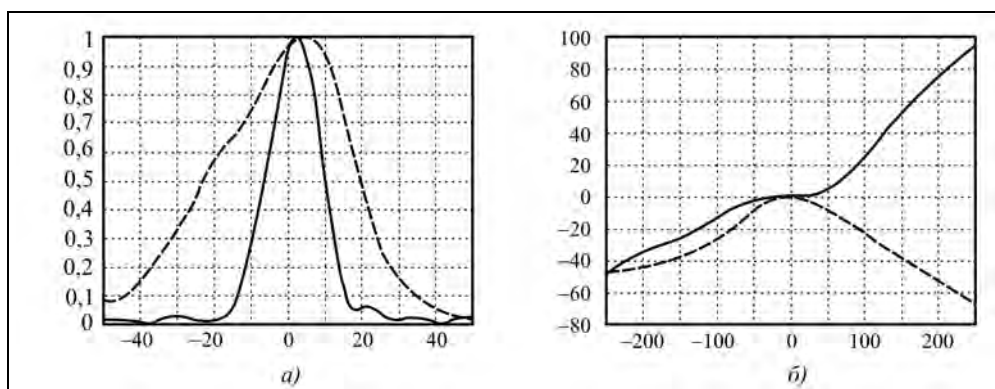


Рис. 11.5. Вид импульсного отклика РСА (а) и фаза спектра (б)

#### 11.1.4. Оценка уровня боковых лепестков импульсного отклика РСА

Максимальный уровень боковых лепестков PSL (peak sidelobe level) импульсного отклика РСА оценивают по отметкам от мощных целей. Для оценки и интегрального уровня боковых лепестков ISLR (integral sidelobe ratio) можно измерить динамический диапазон по фону в провале функции радиолокационного рельефа – в элементах неотражающей поверхности (реки, малые водоемы), окруженных фоном с интенсивным отражением. После этого делают поправку на уровень собственного шума

$$\text{ISLR} = \frac{\text{mean}\{A_{\text{sn}0}^2\} - \text{mean}\{A_{\text{ne}}^2\}}{\text{mean}\{A_{\text{sn}1}^2\} - \text{mean}\{A_{\text{ne}}^2\}}, \quad (11.11)$$

где  $\text{mean}\{A_{\text{sn}0}^2\}$  и  $\text{mean}\{A_{\text{sn}1}^2\}$  – средняя мощность в отчетах РЛИ на неотражающем участке и на окружающем интенсивном фоне;  $\text{mean}\{A_{\text{ne}}^2\}$  – средняя мощность шумов. Ее измеряют в начале кадра РЛИ до прихода отраженных от сигналов или на протяженном участке спокойной водной поверхности.

#### 11.1.5. Оценка радиометрического разрешения РСА

Мерой радиометрического разрешения является уровень флуктуаций на выходе некогерентного накопления. Взаимосвязанные характеристики – точность оценки максимального правдоподобия  $\sigma$  для ЭПР и  $\sigma_0$  для УЭПР и радиометрическое разрешение однозначно определяются числом независимых отсчетов  $N$  на площади объекта  $S_{\text{geom}}$ , включая внутриэлементное  $N_e$  и межэлементное  $N_s$  накопление. Среднеквадратическое отклонение сигнала на выходе квадратичного детектора при наблюдении фона местности

$$\sigma_s = (N_e N_s)^{-1/2} = (N_e S_{\text{geom}} / S_e)^{-1/2}. \quad (11.12)$$

Дифференциальное радиометрическое разрешение двух участков фона с разными  $\sigma^0$  с учетом действия шумов, характеризуемых отношением чувствительности РСА ( $\sigma_{\text{ne}}^0$  – сигма нулевое шумового эквивалента) к  $\sigma^0$  опорного уровня фона

$$\delta K = \frac{1 - \sigma_{\text{ne}}^0 / \sigma^0}{\sqrt{N_e N_s}}. \quad (11.13)$$

#### 11.1.6. Оценка динамического диапазона и линейности амплитудной характеристики РЛИ

Динамический диапазон РЛИ (в децибелах) будем характеризовать отношением максимального уровня сигнала (амплитуды  $A_{\text{max}}$  или мощности  $E_{\text{max}}$ ) к среднему значению шумов (усреднение по мощности –  $A_{\text{ne}} = \sqrt{\text{mean}\{A_{\text{ne}}^2\}} = \sqrt{\text{mean}\{E_{\text{ne}}\}}$ )

$$D_{\text{max\_dB}} = 20 \lg \frac{A_{\text{max}}}{\sqrt{\text{mean}\{A_{\text{ne}}^2\}}} = 10 \lg \frac{E_{\text{max}}}{\text{mean}\{E_{\text{ne}}\}}. \quad (11.14)$$

Шумы измеряют по снимку на спокойной водной поверхности (например, озеро в верхней части РЛИ на рис. 11.2) или радиолокационным теням от высоких объектов. Для оценки максимального уровня используют интерполированное РЛИ (в 2–4 раза).

Линейность проверяют по отметкам от угловых отражателей с известными ЭПР, также используя интерполированное РЛИ. Следует отметить, что оценка линейности РЛИ была особо актуальна при оптическом синтезе радиоголограммы с регистрацией РЛИ на фотоносителе.

При цифровом синтезе (линейной фильтрации радиоголограммы) нарушения линейного закона передачи значений ЭПР в выходное РЛИ может вызываться ограничением разрядной сетки в процессоре обработки (на выходе или в промежуточных процедурах), а также наличием аддитивного шума (шумов приемника, помех, вызванных интегральным уровнем боковых лепестков импульсного отклика РСА и неоднозначностью сигналов), который добавляется к сигналам от слабых целей. Нелинейности амплитудных характеристик и ограничение в приемнике и АЦП приводят к изменению средней крутизны передачи сквозного радиолокационного тракта, а также некоррелированного с изображением шумового фона, вызванного комбинационными составляющими. При этом в локальных участках РЛИ, соответствующих длительности зондирующего импульса и ширине ДНА, сохраняется линейность передачи реальных контрастов. Различие крутизны линейных законов РЛИ проявляется при наблюдении разных ландшафтов подстилающей поверхности (море, суша, горная местность).

### **11.1.7. Интегральный эвристический критерий оценки информативности космических РСА**

Необходимость разработки критериев для оценки информативности систем радиолокационного наблюдения ощущалась многими исследователями [28, 386, 413]. Однако некоторые из разработанных критериев носят частный характер, для других требовалась четкая информация об априорных вероятностях состояний наблюдаемого объекта, алгоритмах классификации и другие данные, зачастую отсутствующие у проектировщика аппаратуры. Ни один из рассмотренных критериев не учитывал фактор устаревания информации – наиболее важное качество радиолокационной съемки.

В настоящее время потребитель располагает широким ассортиментом информационных продуктов, включающих различные режимы съемки, различную глубину обработки и различную их стоимость. Подходящего инструмента для сравнительной оценки применимости данного продукта для решения конкретных задач и их совокупности не было.

Наиболее эффективным представляется обобщенный интегральный эвристический критерий оценки информативности космических РСА и многофункциональных систем ДЗЗ, основанный на экспертной оценке требуемых параметров системы радиолокационного наблюдения (СРЛН) для решения конкретных потребительских задач и сравнения требуемых параметров с параметрами используемой

аппаратуры. Он органически включает в себя частные критерии оценки качества РЛИ, система параметров и интегральных оценок является открытой для расширения и может включать в себя разные аспекты проектирования РЛС (производительность, надежность, стоимость и т.д.).

Эвристический критерий учитывает, что РСА относятся к иконическим метрическим информационным системам, передающим информацию о наблюдаемой поверхности и объектах через изображение, каждый отсчет (пиксель) которого характеризует ЭПР соответствующего элемента на земной поверхности с заданными координатами, при определенных условиях и параметрах радиолокационного информационного канала. Применительно к РСА, предназначенным для решения задач ДЗЗ, перечень параметров системы РЛН приведен в табл. 11.1.

Для оценки качества системы анализируется многомерное метрическое пространство, в котором радиолокационный канал характеризуется вектором параметров – условий наблюдения  $\mathbf{P}_{sar}$ , наблюдаемый объект – вектором требуемых параметров  $\mathbf{P}_{treb}$  (функционал от условий наблюдения). Информативность системы РЛН оценивается по вектору  $\mathbf{R}_{inf}$  (матрице  $\mathbf{R}_{inf} = \|\mathbf{R}_{sar\_k}, k\|$  – для многоканальной системы РЛН) контрольных параметров с помощью функции оценки информации (ФОИ) для данной задачи, в качестве которой используется монотонная неотрицательная функция, например, экспоненциальная (как, например, в работе Р. Мура для разрешаемого «объема» [413])

$$R_{inf} = \frac{1}{N_z} \sum_{n=1}^{N_z} \frac{v_n}{M} \prod_{j=1}^M V_j = \frac{v_n}{N_z} \sum_{n=1}^{N_z} \frac{V_{max}}{M} \prod_{j=1}^M \exp(-\alpha_j R_j), \quad (11.15)$$

где  $N_z$  – число решаемых задач по совокупности;  $v_n$  – коэффициент значимости задачи;  $V_{max}$  – максимальная оценка информативности в баллах (например,  $V_{max}=5$ );  $V_j$  – оценка информативности  $j$ -го канала ( $0 \leq V_j \leq V_{max}$ );  $R_j = P_{sar\_j}/P_{treb\_j}$  – отношение реализуемого параметра радиоканала к требуемому для решения данной задачи;  $M$  – число контрольных параметров;  $\alpha_j$  – коэффициент, определяемый допустимым снижением общей оценки для выполнения задачи  $V_j$  (например,  $V_{j\_OK}=4$  балла при  $R_j=1$ , тогда  $\alpha_j \approx -\ln\left(\frac{V_{j\_OK}}{V_{max}}\right) = 0,223$ ).

Предполагается, что информационные и потребительские качества СРЛН возрастают при уменьшении параметра  $R_j$ . Это имеет место для таких технических параметров аппаратуры, как пространственное и радиометрическое разрешение, чувствительность РСА, время повторной съемки, а также массы и стоимости аппаратуры. Для других параметров, таких как, например, полоса съемки, производительность съемки, области географической доступности съемки (они отмечены в табл. 11.1 звездочкой «\*»), при вычислении параметра  $R_j$  берут обратное отношение – отношение параметра аппаратуры, требуемого для решения данной задачи, к реализуемому.

Таблица 11.1. Информационные параметры космической системы радиолокационного наблюдения

Параметры	Размер -ность	Обозна- -чение	Требуемые значения	Обеспечиваемые РСА значения	Примечания
Широта географическая*	град	$\varphi_r$	90 (с.ш.) -90 (ю.ш.)	-	Определяется углом наклонения орбиты и выносом полосы обзора
Угол облучения*	град	$\gamma$	0-90	10-60	Ограничен ухудшением разрешения для $\gamma_{\max}$ , потенциалом и условием однозначности для $\gamma_{\min}$
Азимут облучения*	град	$\alpha$	0-360	0-20; 60-200; 340-360	В полярных широтах
Длина волны*	см	$\lambda$	2-250	30-60; 120-150; 220-240; 300-330	В средних широтах. Зависит от угла наклонения орбиты, широты положения орбиты объекта, ветви витка
Оптимальная длина волны	см	$\lambda_{\text{опт}}$	-	3-100	Ограничена тропосферными ( $\gamma_{\text{трп}}$ ) и ионосферными ( $\gamma_{\text{иос}}$ ) нестабильностями. Зависит от различных возможностей отраженных сигналов от данного типа поверхности и решаемой задачи
Поларизация на излучение/прием*		Pol	ВВГ, ГГВ	ВВГ, ГГВ	Определяется различием ЭПР при изменении поляризации сигналов
ЭПР объекта наблюдения	м <sup>2</sup>	$\sigma$	ВВГ, ГГВ	-	При наблюдении сосредоточенных объектов $\sigma$ зависит от типа объекта.
УЭПР отражающей поверхности, чувствительность РСА	дБ	$\sigma_{\text{уп}}^0$	-40...0	-	Определяется отражающей способностью наблюдаемой поверхности. Зависит от длины волны, поляризации на излучение и прием, углов облучения
Размер дешифрируемого элемента, линейное разрешение радиолокатора:	м	$\Delta L$	1-2000	0,5-3000	
разрешение по дальности	м			0,5-1000	
разрешение по азимуту	м			0,5-3000	
Радиометрическое разрешение по приращению	дБ	$K_{\text{рм}}$	0,1-10	-	Определяется типом поверхности и решаемой задачей
Число независимых отсчетов*		$\Delta K_{\text{рм}}$	0,02-10	-	
Интегральный уровень сигналов неоднозначности	дБ			-40...-10	Учитывается при расчете радиометрического разрешения
Площадь однодородного сегмента	м <sup>2</sup>	$S_{\text{одн}}$	1-10 <sup>6</sup>	-	Расчет $\Delta K_{\text{рм}}$
Максимальный размер объекта, зона захвата*	км	$r_{\text{макс}}$	5-1000	5-1000	Определяется площадью изоморфной области на местности, допускающей статистическую обработку РЛИ; усреднение, измерение гистограмм, спектральный и текстовый анализ
Периодичность наблюдения	км			10-1000	Расчет производительности РСА
Время перенацеливания	сут	$\Delta T$	0,05-300	0,1-20	Определяется динамикой объекта, периодичностью обзора
Суточная производительность съемки*	с	$T_{\text{р}}$	1-300	-	Расчет производительности РСА
	мин	$T_{\text{числ}}$		-	Расчет производительности РСА

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Рассмотрим порядок выбора параметров, входящих в интегральный критерий, применительно к решению задач ледовой разведки, сельскохозяйственного мониторинга и обеспечения поисково-спасательных работ. Проиллюстрируем расчет оценки на простых примерах однорежимных космических РСА ERS-1/2 *S*-диапазона волн и РСА «Меч-КУ» *S*-диапазона волн. Оценку проведем по трем параметрам, взятым из исходных данных [97]: требуемым пространственному разрешению  $\delta L = \rho_x = \rho_y$ , радиометрическому разрешению  $\delta K$  и времени обновления информации  $\delta T$ .

В табл. 11.2 приведены требуемые и реализуемые с помощью выбранных РСА параметры для каждой из задач. Значительная разница в значениях времени обновления информации вызвана тем, что в РСА ERS-1/2 полоса съемки 100 км фиксирована относительно надир, а в РСА «Меч-КУ» при меньшей полосе съемки 45 км предусматривалось ее перенацеливание в полосу обзора 2×350 км (двусторонний обзор). Радиометрическое разрешение задано дифференциальным контрастом  $\delta K$ , в скобках указано абсолютное значение разрешаемого контраста  $K$  в децибелах.

**Таблица 11.2. Требуемые и реализуемые параметры космических РСА**

Решаемая задача	Требуемые параметры РСА			Оценка	
	$\delta L$ , м	$\delta K / (K)$	$\delta T$ , сут	ERS-1/2	«Меч-КУ»
Ледовая разведка	300	1 / (3 дБ)	3	3,76	4,32
Сельскохозяйственный мониторинг	30	1 / (3 дБ)	10	4,06	4,41
Поисково-спасательные работы	3	1 / (3 дБ)	1	1,75	2,87
Аппаратура РСА	Реализуемые параметры			Интегральные оценки	
	$\delta L$ , м	$\delta K / (K)$	$\delta T$ , сут		
ERS-1/2	30	0,6 / (2 дБ)	12	2,78	3,8
«Меч-КУ» КА «Алмаз-1»	12	1 / (3 дБ)	3		

Предварительно примем, что получаемая информация для определенной задачи будет непригодна при оценке  $V_{j\_min} \sim$  два балла и ниже. Это будет соответствовать увеличению контролируемого параметра более чем в 4,1 раза относительно заданного значения

$$R_{j\_max} = \frac{1}{\alpha_j} \ln(V_{max}/V_{j\_min}) = \frac{\ln(V_{max}/V_{j\_min})}{\ln(V_{max}/V_{j\_OK})} = 4,1. \quad (11.16)$$

Ограничившись случаем равнозначности задач  $v_n=1$  и подставив соответствующие параметры в формулу (11.15), получаем значения оценок, которые приведены в табл. 11.2 по каждой задаче и по совокупности задач. В табл. 11.3 приведены данные оценок по каждому из параметров, жирными цифрами отмечены неудовлетворительные оценки. Они относятся к задаче обеспечения поисково-спасательных работ (требуется более высокое разрешение, чем реализуемое рассмотренными РСА) и ледовой разведки для ERS-1/2 (большое время обновления информации). Интегральные оценки – на «три с минусом» для ERS-1/2 и на «четыре с минусом» для РСА «Меч-КУ». Современные многорежимные РСА высокого

## Глава 11. Калибровка РСА

разрешения и гибким управлением параметров обзора справляются с этими и многими другими задачами с интегральной оценкой на «пять».

**Таблица 11.3. Оценка информативности РСА в баллах по отдельным параметрам**

Решаемая задача	Частные оценки по параметрам			Интегральная оценка	Аппаратура
	$\delta L$	$\delta K$	$\delta T$		
Ледовая разведка	4,88	4,37	<b>2,05</b>	3,67	ERS-1/2
	4,95	4	4	4,32	«Меч-КУ»
Сельскохозяйственный мониторинг	4	4,37	3,82	4,06	ERS-1/2
	4,57	4	4,67	4,41	«Меч-КУ»
Поисково-спасательные работы	<b>0,54</b>	4,37	<b>0,34</b>	<b>1,75</b>	ERS-1/2
	<b>2,05</b>	4	2,56	2,87	«Меч-КУ»

Некоторые особенности имеет оценка многоканальных (многочастотных, полиметрических) РСА. Естественно, что использование дополнительных каналов повышает информативность системы. Для многоканальных систем РЛН учитываем, что при решении конкретной тематической задачи один из каналов является опорным, дающим основной объем информации, а остальные – дополнительными. Имеют место три типичных ситуации: сильно и слабо коррелированной информации в дополнительных каналах, возможность решения задачи только при совместной обработке информации. В первом случае информация дублирует опорный канал и выигрыш сводится к некогерентному накоплению, которое приводит к улучшению радиометрического разрешения. Во втором случае информативность СРЛН оценивается через приращение информации от дополнительных каналов с учетом его вклада в общий критерий (эвристическая оценка по экспериментальным данным). В третьем случае обязательно совместной обработки информации двух (и более) каналов увеличивается количество контрольных параметров в выражении (11.15).

Применение рассмотренного критерия информативности систем РЛН может оказаться полезным при сравнительном анализе разной аппаратуры РСА или поиске новых проектных решений, техническая или экономическая целесообразность введения которых требует обоснования.

### 11.2. Методы и средства калибровки

К современным РСА предъявляются требования как к измерительному инструменту, который, фиксируя отраженное электромагнитное излучение, позволяет измерить электродинамические или геометрические характеристики элементов подстилающей поверхности или объектов на ней. Данные измерений и результаты их обработки с получением оценок требуемых параметров являются содержанием первичных или окончательных информационных продуктов. Достижение высокой точности радиометрической информации обеспечивается калибровкой аппаратуры РСА и аттестацией выходного информационного продукта [81, 130\*, 263, 311, 336, 340, 343, 358, 443, 467, 517].



Калибровка предполагает сравнение результата с некоторой эталонной величиной для обеспечения независимости полученных данных от характеристик РСА и метода формирования конечных изображений. При калибровке РСА соответствующей процедуре должны подвергаться:

радиолокационный канал (объект наблюдения, трасса прохождения сигнала, антенная система и приемопередающее устройство);

система регистрации данных;

процессор формирования изображений;

методика и аппаратура определения характеристик сюжета по его изображениям.

Применяют методы внутренней и внешней калибровки. *Внутренняя калибровка* используется при предполетной подготовке РСА, а также в полете. Она реализуется с помощью специальных технических средств (измерителей, датчиков контрольных сигналов и т.д.), закладываемых в аппаратуру, и соответствующих контрольных режимов, включаемых в циклограмму наземной отработки РСА или ее контроля в полете.

*Внешняя калибровка* выполняется в полете при штатной работе РСА по специально подготовленной обстановке при использовании наземных средств с известными характеристиками – эталонных отражателей, транспондеров, калибровочных полигонов, протестированных участков местности. Кроме того, применяются специальные контрольные или юстировочные режимы, позволяющие в полете оценить характеристики устройств, входящих в РСА. В результате внешней калибровки обеспечивается сверка получаемой информации с известными характеристиками тест-объектов, а также производится поверка бортовых средств внутренней калибровки.

Стабильность точностных характеристик выходной информации поддерживается организационно-техническими мероприятиями – службой калибровки, которая постоянно контролирует и фиксирует состояние аппаратуры и ее параметры и при необходимости включает в программу работы контрольные или испытательные режимы или переключение на резервные блоки. Результаты измерений положения лучей антенны, проведенных в юстировочных режимах, могут включаться как поправки в контур управления ориентацией КА для устранения систематических погрешностей.

### **11.3. Состав калибруемой аппаратуры космических РСА**

Космическая радиолокационная аппаратура ДЗЗ как система включает в себя космический и наземный сегменты, связанные линией передачи данных.

*В состав аппаратуры* входят следующие функциональные подсистемы:

приемопередающий радиолокационный канал (каналы);

устройства преобразования, запоминания и обработки информации (входящие в составы космического или наземного сегментов);

устройство сопряжения с бортовой навигационной аппаратурой;

радиолиния передачи данных.

В современной радиолокационной аппаратуре ДЗЗ информационная связь между подсистемами обеспечивается путем обмена цифровыми данными, являющимися первичными, промежуточными или конечными информационными продуктами, а также массивами служебной информации. Служебная информация

## Глава 11. Калибровка РСА

должна быть достаточной для выполнения геометрических или радиометрических преобразований данных или извлечения из них метрологических характеристик. Получение этой служебной информации также является одной из задач калибровки аппаратуры как предполетной, так и в процессе эксплуатации.

Задачи калибровки аппаратуры и перечень контролируемых параметров могут несколько различаться в зависимости от конкретного назначения радиолокационной аппаратуры ДЗЗ, особенностей ее построения, типа приемопередающих каналов, конфигурации бортового и наземного оборудования.

В состав радиолокационного канала входят (рис. 11.6):

- синхронизатор;
- генератор опорных сигналов (ГОЧ);
- блок формирования зондирующего сигнала (БФС);
- усилитель мощности;
- переключатель прием/передача (антенный коммутатор);
- антенна;
- приемник;
- аналого-цифровые преобразователи (АЦП);
- устройства управления и контроля.

Приемник когерентного канала включает в себя:

- малощумящий усилитель;
- смеситель (преобразователь частоты);
- усилитель промежуточной частоты (УПЧ) с регулируемым усилением;
- фазовые детекторы двух квадратурных составляющих;
- видеоусилители.

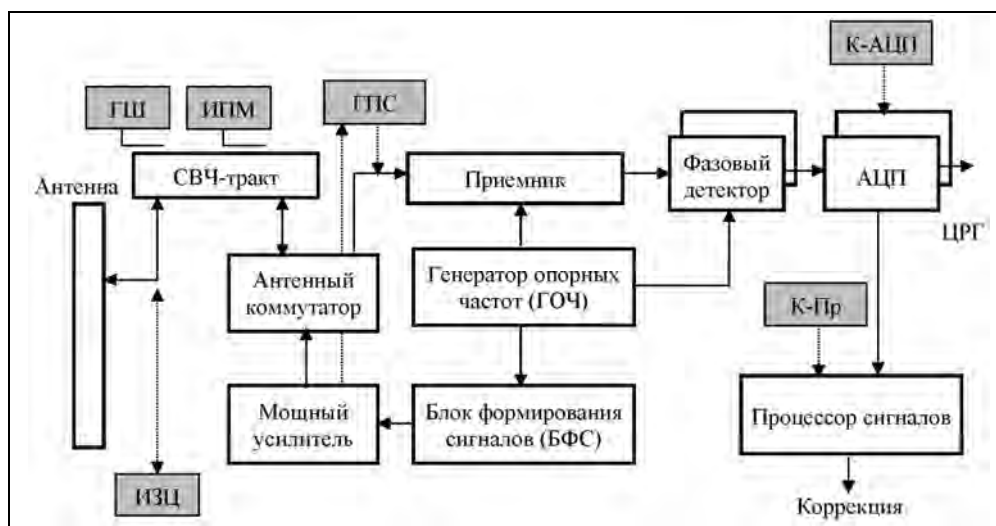


Рис. 11.6. Обобщенная структурная схема РСА с калибровочными датчиками для внутренней калибровки:

ИЗЦ – имитатор задержанной цели; ИПМ – измеритель проходящей мощности; ГШ – генератор шума; ГПС – генератор пилот-сигнала; К-АЦП – калибратор АЦП; К-Пр – калибратор процессора сигналов

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

Перечень и основные функции устройств, необходимых для проведения *внутренней калибровки* РСА, приведены в разделе 11.5.

Средства внутренней калибровки в сочетании с внешними эталонами (искусственными целями) позволяют проводить сравнение показаний встроенных датчиков с реакцией на эталонную цель и распространять данные калибровки на другие кадры, где отсутствуют средства внешней калибровки.

*Внешняя калибровка* РСА производится с помощью пассивных и активных источников эталонных сигналов:

миры из точечных пассивных, например, уголковых отражателей, позволяющих оценивать геометрические характеристики (разрешающую способность, точность измерения координат);

активные калибраторы – приемопередатчики (транспондеры), создающие эталонные цели со строго определенными параметрами, в том числе и для поляриметрических измерений;

поверхностно-распределенные цели с известными и постоянными значениями УЭПР, к таким эталонным участкам, в частности, относятся участки тайги и тропического леса в Южной Америке.

Для измерения характеристик тракта РСА при внешней калибровке могут предусматриваться специальные калибровочные и контрольные режимы, в том числе с применением специальных разворотов КА:

режим для снятия формы ДНА и юстировки антенны в угломестной плоскости;

режим для снятия формы ДНА и юстировки антенны в азимутальной плоскости;

режим измерения температуры антенного входа.

В составе КА предусматривается аппаратура, в том числе система позиционирования GPS, ГЛОНАСС, астроблоки системы измерения положения, с использованием которых улучшаются точностные характеристики получаемого информационного продукта.

Особая задача калибровки имеет место для целей интерферометрической обработки информации с целью получения цифровых карт рельефа (ЦКР). Здесь требуются точные измерения размеров и углового положения интерферометрической базы (что особенно осложнено при многопроходной интерферометрии) и обеспечение высокой стабильности фазы в интерферометрических каналах, на которую влияют многие аппаратурные факторы, характеризующие также точность радиометрических измерений (шумы, форма отклика, фазовые характеристики тракта и др.).

### **11.4. Технологическая цепочка калибровки РСА**

Технологическая цепочка калибровки РСА (рис. 11.7) включает в себя:

1) сбор информации об аппаратуре РСА в процессе предполетной подготовки, включая измерения параметров аппаратуры при ее наземной отработке и испытаниях, калибровку встроенных датчиков, фиксацию данных контрольных режимов;

2) сбор информации об аппаратуре РСА после развертывания ее на орбите, проведения первоначальных и текущих контрольных и калибровочных режимов в соответствии с программой полета, а также при необходимости;

## Глава 11. Калибровка РСА

- 3) сбор и обработку данных внешней информации о состоянии тестовых полигонов, погодных условиях в районах съемки, данных цифровых карт рельефа и др.;
- 4) анализ информации об РСА, формирование данных для коррекции радиолокационных данных в процессе синтеза радиолокационного изображения (РЛИ), действительного или комплексного (КРЛИ);
- 5) коррекцию радиометрических, фазовых, частотных и других искажений в радиолокационной информации (радиоголограмм, синтезированных РЛИ и КРЛИ, нормализованных и геокодированных РЛИ и КРЛИ).



Рис. 11.7. Технологическая цепочка калибровки РСА

Получаемый цифровой информационный продукт характеризуется следующими параметрами:

- масштабами изображения вдоль  $M_x$  и поперек  $M_y$  линии пути (размеры пикселя на местности) и геометрией РЛИ;
- пространственным разрешением  $\rho_x, \rho_y$ , измеряемым по уровню минус 3 дБ;
- уровнем боковых лепестков  $k_{сб}$  передаточной функции;
- интегральным уровнем боковых лепестков  $k_{на}$  передаточной функции, включая неоднозначность по дальности и азимуту;
- коэффициентом пересчета цифровых отсчетов  $K_p$  в удельную эффективную поверхность рассеяния  $\sigma^0$ ;
- числом независимых отсчетов в элементе разрешения  $N_e$  (определяет закон распределения флуктуаций шума и процесса шум+фон);

чувствительностью РСА – удельной эффективной поверхностью рассеяния шумового эквивалента  $\sigma_{\text{не}}^0$ ;

динамическим диапазоном РЛИ  $D = 10 \lg(A_{\text{max}}^2 / M_1 \{A_{\text{noise}}^2\})$ , где  $A$  – отсчеты амплитуды ( $A^2$  – отсчеты мощности ЭРЛИ).

Значения этих параметров рассчитываются по паспортным данным РСА с учетом условий съемки и уточняются на основе калибровочной информации. При аттестации информационного продукта измерения проводятся непосредственно по нему с учетом имеющейся информации о подстилающей поверхности или тест-объектам.

### **11.5. Методы предполетной калибровки**

Предполетная калибровка аппаратуры является первым этапом комплекса процедур метрологической аттестации и сертификации аппаратуры дистанционного зондирования Земли.

*Методы калибровки* включают в себя:

непосредственные измерения внешних (входных, выходных) параметров аппаратуры с помощью универсальных измерительных приборов, входящих в состав технологических пультов или контрольно-испытательной аппаратуры (КИА);

измерения с помощью специального технологического оборудования;

измерения параметров аппаратуры с помощью встроенных датчиков, генераторов контрольных сигналов, имитаторов;

калибровку встроенных датчиков, генераторов сигналов и имитаторов;

косвенные методы калибровки аппаратуры;

обобщение и комплексный анализ данных измерений на всех стадиях калибровки аппаратуры.

К внешним параметрам относятся также контрольные параметры аппаратуры, выведенные на специальные контрольные разъемы.

*К непосредственным измерениям* относятся измерения:

частот, вырабатываемых синхронизатором, генератором опорных частот;

расстановки синхроимпульсов, длительностей и задержек;

выходной мощности передатчика (средней, импульсной), спектра зондирующего сигнала;

шумфактора, коэффициентов усиления, частотных и амплитудных характеристик, уровней выходных сигналов приемника (УПЧ и видеотрактов);

градуировочных характеристик АЦП;

напряжений питания первичных и вторичных источников питания.

Специальное технологическое оборудование, встроенные датчики используются для калибровки антенных устройств, фазовых и поляриметрических измерений, оценки сквозных характеристик, когерентности радиолокационного тракта.

Из-за больших геометрических размеров космических антенн для измерения антенных характеристик (коэффициент усиления, форма ДНА, частотная характеристика, направление вектора поляризации) используются безэховые камеры или специальные полигоны. В состав испытательного оборудования должны входить уст-

## Глава 11. Калибровка РСА

---

ройства для приведения антенн из сложеного состояния в рабочее положение. Как правило, непосредственные измерения параметров невозможны, так как дальняя зона удалена на расстояние сотен метров. Используются плоские или цилиндрические сканирующие устройства, измеряющие амплитудное и фазовое распределение поля по апертуре антенны. По измеренным данным с помощью соответствующего программного обеспечения рассчитываются формы ДНА в угломестной и азимутальной плоскостях, а также другие параметры антенны. Операции по верификации характеристик антенн проводятся на стадии автономных испытаний антенн.

Методы измерения пределов сканирования ДНА относительно осей КА зависят от типа антенны. Для антенн с механическим сканированием (волноводно-щелевая или зеркальная) измеряются угловые перемещения подвижной платформы с контролем по механическим датчикам. Для фазуемых антенных решеток (ФАР) с управляемыми фазовращателями кроме отклонений луча и изменения формы ДНА контролируются выходные сигналы устройства управления антенной.

Для АФАР контролю подлежат фазовые и амплитудные характеристики приемопередающих модулей (ППМ): выходная мощность, коэффициент усиления приемной части, затухание встроенных аттенюаторов. В составе ППМ предусматриваются встроенные средства контроля.

Геометрия относительного расположения панелей многоэлементных ФАР или АФАР (в том числе при температурных воздействиях) контролируется механическими датчиками.

При использовании в РСА гибридных зеркальных антенн с облучателями типа АФАР предусматриваются специальные контрольные приемопередатчики для фазировки и калибровки ППМ-облучателей. Параметры контрольных устройств, входящих в состав антенн, ППМ подлежат измерению в процессе предполетной калибровки.

Для автоматизации процесса предполетной калибровки и максимального приближения момента измерений к запуску КА в состав бортовой аппаратуры должны включаться следующие устройства.

В СВЧ-тракт, соединяющий антенну с сосредоточенной запиткой (типа ФАР или зеркальную) с приемопередатчиком, встраивают датчики, предназначенные для калибровки приемопередающих устройств и сквозных характеристик радиоканала. Эти устройства используются как при предполетной калибровке, так и в процессе эксплуатации на орбите. В состав этих устройств входят:

1) измеритель проходящей мощности (направленный ответвитель с детекторной секцией с цифровым выходом) для контроля импульсной мощности передатчика с включением результата измерений в состав служебной информации;

2) измеритель шумфактора приемника (генератор шума на лавинопролетном диоде с измерением уровня шумов приемника, управлением по командам и передачей результатов измерений в составе служебной информации);

3) имитатор цели на гиперзвуковых линиях задержки, формирующих задержанную копию зондирующего сигнала для сквозной проверки тракта;

4) имитатор цели с преобразованием сигнала в оптический диапазон, далее задержки на волоконно-оптических линиях и обратным преобразованием в СВЧ-диапазон;

5) генератор пилот-сигнала, вводимого в приемный тракт из передатчика – ослабленный зондирующий сигнал (сложность состоит в наличии высокого уровня мощности в момент излучения, перегружающего приемник, который в это время запирается импульсом супрессии, возможный выход – снимать пилот-сигнал до мощного усилителя, не включая его, но при этом выходные каскады исключаются из контроля и калибровки);

6) синтезатор частот, подключаемый ко входу приемника для снятия амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик тракта, фазового сдвига квадратурных составляющих, подаваемых на фазовые детекторы;

7) устройства ввода в ЭВМ цифровой информации с выхода АЦП, с контрольных и телеметрических датчиков с целью их последующего компьютерного анализа для оценки характеристик системы.

Для калибровки приемопередатчика и встроенных датчиков предусматривают технологическую вставку в СВЧ-тракт для подключения эквивалента антенны (согласованной нагрузки) или внешних измерительных приборов из состава КИА (измерителей мощности, шумфактора, имитаторов целей и др.).

В приемном тракте предусматривают цифровые аттенюаторы для регулирования усиления приемника с поддержанием уровня шумов или суммарного сигнала.

На выходе приемника должны предусматриваться цифровые генераторы контрольных сигналов для снятия градуировочных кривых и калибровки АЦП. Выбор разрядности АЦП должен учитывать не только требования передачи рабочей информации, но и обеспечение задачи калибровки (предполетной и в полете).

В устройствах контроля РСА предусматриваются измерители уровня сигналов на выходе приемника после АЦП (используются цифровые измерительные устройства, определяющие шумфактор приемника, положение максимума ДНА при ошибках ее ориентации и т.д.). В РСА может быть введен специальный контрольный режим, дополненный измерителем доплеровской частоты, контролирующим уходы азимутальной ДНА. Предусматриваются датчики контрольных задач для проверки и калибровки цифровых устройств обработки сигналов (сжатия по длительности, синтеза апертуры, некогерентного накопления). Основное назначение этих устройств – получение калибровочной информации в процессе полета. При предполетной калибровке должна обеспечиваться калибровка этих измерителей с помощью тест-сигналов, имитирующих реальные сигналы.

Методика предполетной внутренней калибровки включает в себя три основных этапа:

- 1) калибровка антенны в процессе автономных испытаний антенны;
- 2) сквозная калибровка приемопередающего тракта с помощью генератора пилот-сигнала и имитатора целей с вводом данных с выхода АЦП в ЭВМ;
- 3) калибровка процессоров сжатия импульсов по длительности, синтеза апертуры, формирования РЛИ и КРЛИ, некогерентного накопления.

Амплитудная и фазовая характеристики зондирующего импульса оцениваются по пилот-сигналу при комплексных испытаниях путем анализа записанной информации с АЦП.

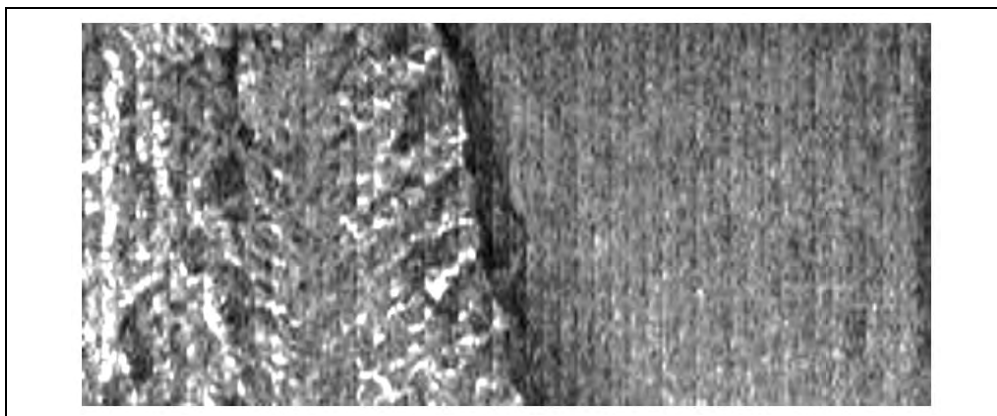
Поляриметрическая калибровка предполагает проведение калибровки поляризационных каналов относительно друг друга. При этом требуется точное измерение не только амплитуды, но и фазы. Для поляриметрической калибровки приемопередающего (кроме развязки) тракта наиболее эффективно использование пилот-сигнала, вводимого в СВЧ-тракт с контролем выходных сигналов по информации с выходов АЦП. При этом усиление приемных каналов должно поддерживаться таким образом, чтобы напряжение шумов на выходе было одинаковым.

Для снижения ошибок внутренней калибровки используется многократное повторение измерений с последующей статистической обработкой результатов. Точность функционирования устройств внутренней калибровки обеспечивается поддержанием заданных режимов, периодической проверкой по сигналам внешних калибровочных устройств (как наземных в процессе предполетной калибровки, так и в полете) и тщательностью изготовления и настройки аппаратуры.

### 11.6. Методы оценки параметров аппаратуры РСА в полете и коррекции искажений при обработке информации

#### Измерение формы диаграммы направленности антенны по азимуту

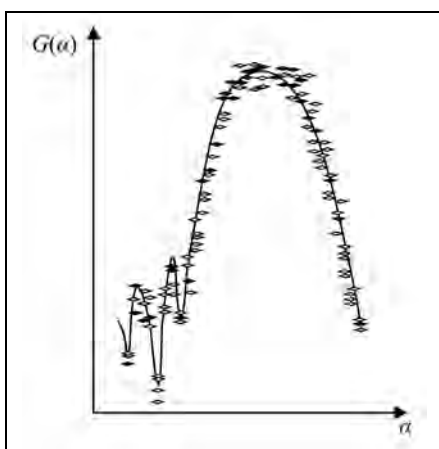
Необходимость измерения формы азимутальной ДНА вызвана тем, что она определяет амплитудную весовую функцию при синтезе апертуры и таким образом влияет на форму выходного отклика РСА. Кроме того, при кадровом режиме синтеза апертуры (например, методом быстрой свертки) могут появляться радиометрические искажения. Они особенно заметны в режиме Скансар, при различном положении целей относительно центра обрабатываемого кадра (максимума азимутальной ДНА). На рис. 11.8 приведен пример РЛИ, полученного при нефокусированном синтезе методом БПФ с последующим некогерентным накоплением. Заметна модуляция яркости РЛИ волнообразного характера. Для коррекции таких радиометрических искажений необходимо точное знание формы азимутальной ДНА.



**Рис. 11.8.** Фрагмент первичного (без коррекции) РЛИ, полученного путем нефокусированного синтеза методом БПФ с некогерентным накоплением (Санта-Барбара, США, РСА «Меч-КУ», КА «Алмаз-1»)



Для измерения формы ДНА в азимутальной плоскости используют наземные измерительные приемники, фиксирующие мощность принятого от передатчика РСА сигнала при пролете КА над наземным измерительным пунктом. Применяется также измерение формы ДНА по принятому сигналу, отраженному от наземных имитаторов сосредоточенных целей с большой ЭПР – пассивных, в качестве которых используются зеркальные антенны слежения за космическим пространством, или активных приемопередатчиков – транспондеров, переизлучающих калиброванный сигнал в сторону РСА. Требование большой ЭПР обусловлено необходимостью получения достаточного отношения сигнал/шум для обеспечения точности измерений.



**Рис. 11.9.** Азимутальная форма ДНА по мощности для РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»

Возможно оценить форму ДНА в азимутальной плоскости, а также юстировать ее положение относительно осей КА непосредственно в полете с применением специального режима измерения доплеровской частоты (ИДЧ). Преимущество специального режима состоит в том, что могут быть использованы узкополосный зондирующий сигнал для получения высокого отношения сигнал/шум и повышенная частота повторения, исключаящая эффекты многозначности сигнала по доплеровской частоте. В качестве иллюстрации на рис. 11.9 приведена азимутальная форма ДНА по мощности для РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1», полученная по реальной фоновой обстановке.

### **Измерение формы диаграммы направленности антенны по углу места**

Измерение формы ДНА и юстировка антенны по углу места с помощью наземных средств представляет значительные трудности, поскольку ширина облучаемой зоны измеряется десятками или сотнями километров. Значительно эффективнее использование специального калибровочного режима с низкой частотой повторения (режим, обычно используемый в некогерентных скаттерометрах), при которой отсутствуют эффекты, связанные с неоднозначностью по дальности. Возможна также калибровка ДНА и с параметрами РСА в рабочем режиме, но с перенацеливанием КА в область малых углов падения (к надиру). В качестве тест-объекта предпочтителен выбор участков тропического леса или тайги, имеющих широкую диаграмму рассеяния и стабильный коэффициент отражения. Для повышения отношения сигнал/шум при этих измерениях целесообразно применение узкополосного зондирующего сигнала.

На рис. 11.10 представлена геометрия формирования мощности суммарного процесса по наклонной дальности на выходе приемника. Она включает в себя мощность шумов на выходе приемника, альтиметровый сигнал от подспутниковой точки, отраженный от поверхности Земли, сигнал в пределах главного и боковых

лепестков ДНА. В рабочих режимах обзора, когда период повторения много меньше времени запаздывания, появляется многозначность и происходит «сворачивание» всего диапазона наклонных дальностей в один период рекуррентной дальности  $R_p = cT_p/2$  (поз. 5 на рис. 11.10). Для вычисления ДНА в угломестной плоскости анализируют радиоголограмму и измеряют зависимость амплитуды отраженного сигнала от наклонной дальности, усредняя ее по азимуту. Затем делают пересчет от наклонной дальности в углы визирования по формулам геометрии обзора поперек линии пути.

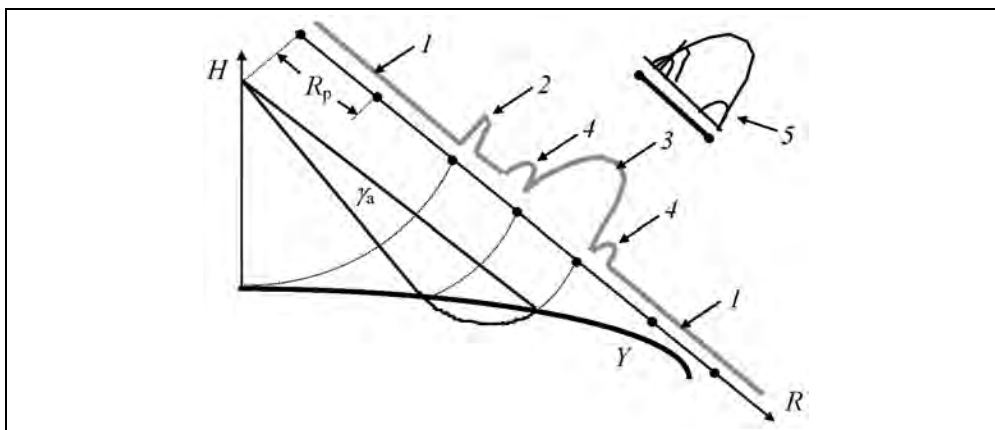


Рис. 11.10. Геометрия формирования мощности суммарного процесса по наклонной дальности на выходе приемника:

1 – шум МШУ + тепловое рассеяние от поверхности Земли в пределах ДНА; 2 – альтиметровый сигнал; 3 – сигнал отраженный от наблюдаемой поверхности в главном лепестке ДНА; 4 – боковые лепестки ДНА; 5 – сворачивание отраженных сигналов в один период рекуррентной дальности (точками показаны моменты излучения зондирующих импульсов)

Пример записи амплитуды сигнала по дальности на выходе приемника (радиоголограммы), снятого в рабочем режиме при малых углах визирования ( $25^\circ$ ) приведен на рис. 11.11. Запись характеризует форму ДНА в угломестной плоскости, для вычисления которой следует сделать поправку на изменение наклонной дальности.

Одновременно с измерением формы ДНА и положения лучей относительно координатных осей КА должна проводиться проверка управляющих команд с определением систематических ошибок установки лучей для их компенсации.

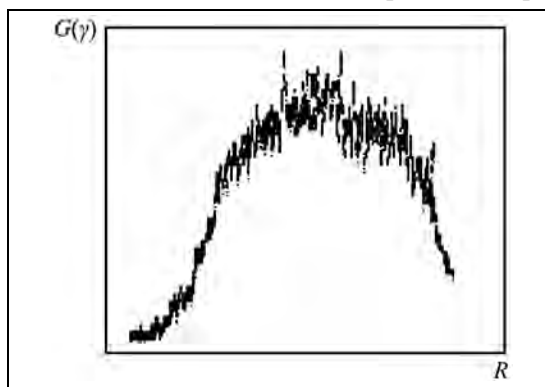


Рис. 11.11. Запись амплитуды сигнала по дальности, характеризующая форму ДНА по углу места (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»)

**Измерение шумовой температуры входа антенны и калибровка генератора шума**

Мощность процесса на выходе РСА, фиксируемая в информационном продукте (РЛИ), является суммой мощности сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, и мощности шумов приемника

$$A^2 = K_{\text{пл}} (P_s + P_m), \quad (11.17)$$

где  $K_{\text{пл}}$  – коэффициент пропорциональности;  $P_s, P_m$  – мощности сигнала и шумов на входе приемника.

В свою очередь по формуле (3.46) мощность шумов на входе приемника определяется следующим выражением:

$$P_m = k\Delta F [T_s + T_0 (F_n - 1)], \quad (11.18)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц×К – постоянная Больцмана (К – градусы Кельвина);  $T_0$  – абсолютная температура приемного устройства;  $T_s$  – температура источника сигнала (земной поверхности);  $\Delta F$  – полоса приемника;  $F_n$  – шумфактор приемника, определяемый параметрами малощумящего СВЧ-усилителя (МШУ) и потерями в СВЧ-тракте.

Температура источника сигнала – это температура поверхности Земли, на которую направлен луч антенны. Обычно принимают  $T_s=290$  °К. Однако получение высокой точности измерения абсолютного значения  $\sigma^0$  подстилающей поверхности требует корректного исключения мощности собственного шума на выходе РСА с учетом доли теплового рассеяния наблюдаемой поверхности. Как правило, коэффициент шума МШУ (с учетом потерь в СВЧ-тракте) близок к 3 дБ (2 раза), т.е. дополнительная мощность тепловых шумов, создаваемых входным транзистором, численно равна мощности шумов от антенны, если температуры МШУ и антенны одинаковы (например, при наземных испытаниях аппаратуры в безэховой камере).

В реальных условиях при измерениях  $\sigma^0$  таких поверхностей, как ледовые поля, морская поверхность, следует вводить поправку на их температуру и уменьшение радиояркостности. Так, если чувствительность РСА, измеренная при  $T=300$  °К, составляет  $\sigma_{\text{не}}^0 = -20$  дБ, а удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР) для толстого однолетнего льда равна  $\sigma^0 = -17$  дБ при радиояркостной температуре льда, равной 160 °К, вместо расчетных 290 °К [193], то значение собственного шума на выходе приемника при наблюдении ледовой поверхности определится шумовой температурой

$$T_n = T_s + T_0 (F_n - 1) = 160 + 290 \cdot (2 - 1) = 450 \text{ °К}, \quad (11.19)$$

вместо ожидаемых 580 °К, если не учитывать радиояркостной температуры наблюдаемой поверхности.

Таким образом, чувствительность РСА при измерении поверхности с малой радиояркостностью улучшится до величины  $\sigma^0 = 0,0077$  (-21,1 дБ). Оценка суммарного процесса фон+шум в значениях УЭПР составит  $\sigma_{\text{fn}}^0 = 0,0277$ , а вычисленное значение  $\sigma^0 = \sigma_{\text{fn}}^0 - \sigma_{\text{не}}^0 = 0,0177$  (-17,5 дБ) вместо истинного значения  $\sigma^0 = -17$  дБ. В этом случае погрешность измерения  $\sigma^0$  ледовой поверхности, вызванная пренебрежени-

ем изменения ее радиояркостной температуры, составит около 0,5 дБ, что является существенным вкладом в суммарную ошибку измерений. Погрешность измерений будет больше для поверхностей с УЭПР, меньшей, чем  $\sigma_{\text{пе}}^0$ , например, при наблюдении почвенного покрова в длинноволновой части СВЧ-диапазона волн, для которого вариации яркостной температуры с изменением влажности грунта от 2 до 40 % достигают 60...90 °К [193].

Рассмотренные выше соотношения могут применяться и для калибровки спектральной плотности мощности шума (СПМШ) контрольного генератора шума (ГШ). Можно, например, сравнивать мощности шумов на выходе приемника при выключенном передатчике, включенном и выключенном ГШ, когда антенну направляют близко к надиру при наблюдении лесных массивов ( $T \sim 290$  °К) и вообще отворачивают от Земли в сторону открытого космоса, для которого шумовая температура не превышает десятков градусов Кельвина. Естественно, для выполнения таких режимов должны быть предусмотрены соответствующие маневры КА.

### **Измерение коэффициента усиления антенны и коэффициента передачи сквозного тракта РСА по мощности**

Для измерения коэффициента усиления (КУ) антенны и коэффициента передачи сквозного тракта РСА по мощности наиболее эффективно в качестве эталона использовать активный имитатор цели – транспондер, с помощью которого можно создать ответный сигнал, значительно превышающий по мощности сигнал, отраженный от близлежащей подстилающей поверхности. Поскольку коэффициент передачи сквозного тракта РСА зависит от формы передаточной функции и амплитудного распределения при сжатии по дальности и азимуту, а также формы ДНА, то целесообразно для измерений КУ антенны использовать немодулированный зондирующий сигнал и малую длительность синтезируемой апертуры с равномерной весовой функцией. Тогда форма отклика будет иметь вид  $\sin x/x$  (и будет легко контролируемой, по уровню сигнала в нулях отклика). Фокусирующая функция должна быть согласована с законом изменения фазы принимаемого сигнала, но ее ошибки не приведут к погрешности измерений вследствие малой длительности синтезированной апертуры.

При использовании транспондера аналогичным образом калибруют и поляризационные характеристики антенны и тракта РСА для всех необходимых комбинаций ВВ, ВГ, ГГ, ГВ, включая в том числе и измерения фазовых характеристик поляризметрических каналов.

Вычисление коэффициента передачи сквозного тракта РСА для рабочих режимов, в том числе и широкополосных с предельным разрешением, производится путем использования встроенного генератора пилот-сигнала (ГПС) с получением формы радиолокационного отклика с реальной передаточной функцией устройств сжатия по дальности и азимуту и с введением поправок, учитывающих реальные амплитудно-фазочастотные характеристики СВЧ-тракта и антенны, которые должны измеряться в специальных контрольных режимах. По данным измерения формы отклика определяются коэффициенты пересчета мощности в максимуме отклика

$A_{\max}^2$  к значению  $\sigma^0$ , которое фиксируется в конечном информационном продукте. Необходимость этой операции вызывается тем, что при амплитудном взвешивании меняется форма отклика и отношение  $\sigma^0/A_{\max}^2$ .

### Измерение амплитудно/фазочастотных характеристик приемника и сквозного тракта РСА

Для измерения амплитудно/фазочастотных характеристик приемника и сквозного тракта РСА вместо рабочего сигнала с большой базой (произведением ширины спектра на длительность зондирующего импульса), не позволяющего проанализировать и разделить частотные и фазовые искажения, предлагается использовать набор зондирующих сигналов (например, 5 вариантов) с максимально большой длительностью импульсов, заполненных ЛЧМ со скоростью изменения частоты в соответствующее число раз (5 раз) меньше, чем в рабочем режиме. Характеристики снимаются путем перебора всех вариантов зондирующего сигнала, причем для приемного тракта используется генератор пилот-сигнала, а для сквозного тракта – эталонный отражатель с большой ЭПР (например, доработанная антенна космической связи) или широкополосный транспондер, откалиброванные в наземных условиях.

Для оперативного контроля характеристик тракта РСА эффективен анализ спектра процессов на выходе приемника в рабочем режиме, в результате которого может быть получена форма корреляционной функции отраженного сигнала и можно принять решение о необходимости корректировки параметров тракта обработки или на проведение специальных калибровочных режимов. На рис. 11.12 представлены спектры радиоголограмм на выходе АЦП для РСА «Меч-КУ» [429\*].

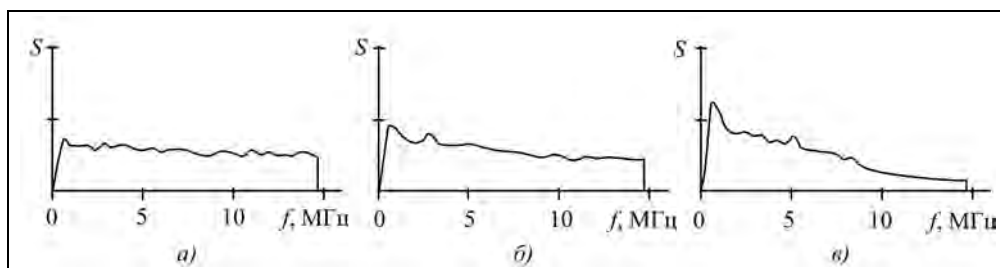


Рис. 11.12. Спектры радиоголограмм:  
а – шум; б – морская поверхность; в – суша

Спектр шумов (рис. 11.12, а) определяется частотной характеристикой приемника и имеет спектральную плотность, близкую к равномерной. Спектр сигнала, отраженного от равномерной протяженной поверхности, определится преобразованием Фурье от корреляционной функции зондирующего сигнала. Для приведенного примера (РСА «Меч-КУ») зондирующий сигнал представлял короткий импульс длительностью 0,07 мкс на пьедестале и длительностью 0,8 мкс с относительным уровнем минус 25 дБ. Корреляционная функция имела острый пик в области частот 1,2 МГц. В зависимости от интенсивности отраженного сигнала от местности (рис. 11.12, б, в) относительная доля спектральных составляющих шума

уменьшается и больше проявляется форма спектра сигнала. Задача коррекции искажений заключается в измерении спектра сигнала и применении цифровой фильтрации при обработке, которая реализуется в частотной области (БПФ, умножение на коэффициенты, реализующие корректирующий фильтр, ОБПФ). Для проектируемых РСА, в которых зондирующий сигнал формируется цифровым способом в БФС (рис. 11.6), амплитудно/фазочастотные искажения, возникающие в тракте РСА, могут быть измерены приведенным выше методом, а их компенсация может быть достигнута введением предискажений в форму зондирующего сигнала.

### Измерение и коррекция нелинейностей амплитудной характеристики приемного тракта и калибровка цифровых аттенюаторов

Отраженный от местности сигнал характеризуется большим динамическим диапазоном, определяемым различием УЭПР наблюдаемой местности. Проходя через приемный тракт РСА, сигнал может подвергаться ограничению и нелинейным искажениям, определяемым формой амплитудной характеристики приемника. Анализируя гистограммы сигнала на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), можно выявить характер этих искажений и частично скорректировать их.

Анализ статистических характеристик цифровых радиоголограмм на выходе АЦП (рис. 11.13 [429\*]) показывает, что амплитудная характеристика приемника имеет ярко выраженный плавный участок, переходящий в ограничение – «мягкое» ограничение. На рис. 11.13, а приведены гистограммы процессов на выходе фазового детектора приемника РСА «Меч-КУ». Анализируются два участка: 1 – морской поверхности и 2 – суши вблизи береговой линии, где отраженные сигналы попадают в область ограничения. Для морской поверхности имеем распределение процесса, близкое к гауссову.

Принятые сигналы от суши в пределах зоны облучения антенны по азимуту имеют также гауссово распределение (в силу центральной предельной теоремы). Но на выходе приемника сигналы попадают в область перегрузки и форма распределения искажается. Моделирование жесткого ограничения (рис. 11.13, б) дает иной характер гистограммы с резким подъемом числа отсчетов на граничных значениях в области ограничения.

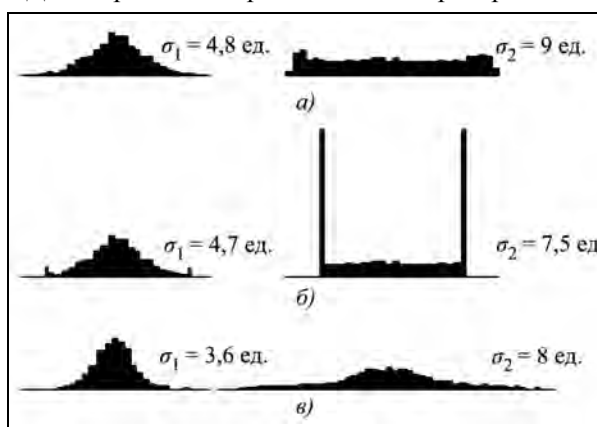
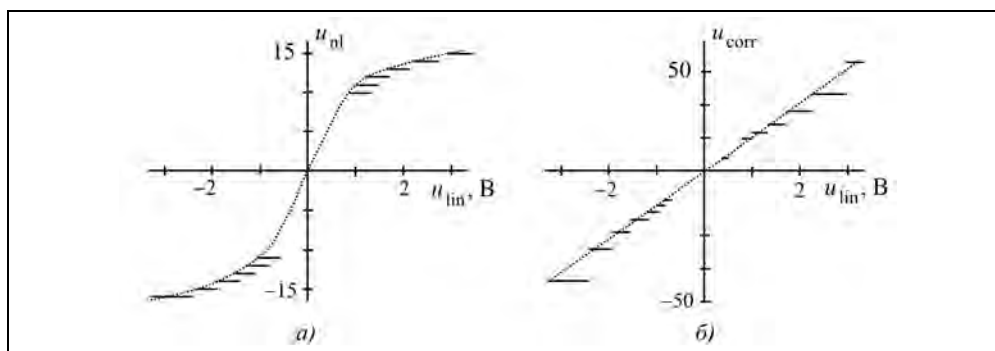


Рис. 11.13. Гистограммы процессов на выходе АЦП:  
а – реальные; б – моделирование жесткого ограничения;  
в – после коррекции нелинейностей

Наличие участков «мягкого» ограничения позволяет скорректировать нелинейность и растянуть сжатые участки путем присвоения шагам АЦП разного веса. Задача коррекции делится на три этапа:

- 1) вычисление среднеквадратичного отклонения процесса до нелинейности;
- 2) измерение амплитудной характеристики приемника;
- 3) коррекция нелинейности.

Процесс коррекции нелинейных искажений иллюстрирует рис. 11.14. На рис. 11.14, *а* показаны амплитудная характеристика приемника и результат ее дискретизации с помощью 5-разрядного АЦП с равномерным шагом. На рис. 11.14, *б* представлена характеристика приемника с коррекцией нелинейности, реализованной путем присваивания шагам АЦП неравномерного веса.



**Рис. 11.14.** Амплитудная характеристика приемника с последующей коррекцией нелинейных искажений:

*а* – на выходе приемника; *б* – в результате коррекции

После радиометрической коррекции гистограммы распределения радиоголограммы на участках моря и суши приближаются к гауссовым со среднеквадратичными отклонениями, соответствующими контрасту море-суша (отношение  $\sigma_2/\sigma_1 = 7$  дБ вместо  $\sigma_2/\sigma_1 = 5,4$  дБ при наличии ограничения).

Существуют методы коррекции и «жесткого» ограничения [466], но «экспандирование» участков «мягкого» ограничения в приемнике дает меньшие потери в отношении сигнала к суммарному шуму на выходе тракта с учетом нелинейности. При проектировании РСА рекомендуется применять ограничение в усилителе промежуточной частоты приемника с выбором размаха АЦП шире размаха выходных сигналов.

Приведенная методика анализа гистограмм на выходе АЦП с измерением СКО позволяет провести калибровку усиления цифровых аттенюаторов приемника, используя в качестве тест-сигнала собственные шумы приемника или суммарный процесс, включающий фон местности.

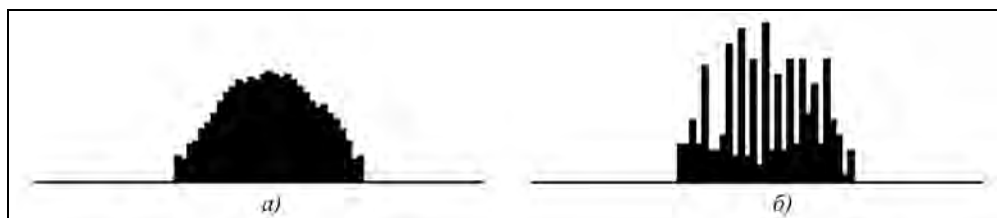
### **Калибровка АЦП**

Входящие в состав приемного тракта АЦП могут использоваться в качестве основного измерительного прибора в бортовой аппаратуре РСА для снятия характеристик различных устройств радиолокационного тракта. АЦП должны разрабатываться таким образом, чтобы они могли выполнять функции широкополосного цифрового вольтметра высокого класса точности (0,2...0,5 %) в широком диапазо-

## Глава 11. Калибровка РСА

не изменения тактовой частоты. Должна быть предусмотрена прецизионная калибровка АЦП в наземных условиях, а также самокалибровка АЦП в полете с применением высокостабильных эталонов ступенчатого и переменного напряжений, обеспечивающих долговременную точность калибровки в условиях температурных воздействий, в том числе при работе в открытом космосе.

Для калибровки АЦП, входящих во все имеющиеся квадратурные, поляриметрические, частотные каналы, должны быть предусмотрены соответствующие контрольные режимы. Оперативный контроль в режиме съемки осуществляется путем анализа гистограмм процесса на выходе АЦП. По результатам контроля должна быть предусмотрена возможность корректировки значений единицы младшего разряда (ЕМР) АЦП непосредственно на борту КА или при обработке информации на Земле. Пример выявления блуждающего дефекта АЦП (уменьшение цены младшего разряда АЦП) при оперативном контроле данных приведен на рис. 11.15.



**Рис. 11.15.** Пример гистограмм процессов на выходе АЦП:  
а – типичная; б – с дефектом уменьшения цены младшего разряда

### Калибровка квадратурных каналов

В состав квадратурных каналов входят генератор опорного сигнала промежуточной частоты, фазовращатель на  $90^\circ$ , фазовые детекторы, видеоусилители и АЦП действительной и мнимой составляющих. Калибровке подлежат коэффициенты передачи каналов, разность фаз действительной и мнимой составляющих, идентичность амплитудно/фазочастотных характеристик.

Различие коэффициентов передачи квадратурных каналов компенсируется изменением цены единицы младшего разряда АЦП. Для калибровки возможно также применение монохроматического пилот-сигнала [440\*].

Различие фаз, измеренное по пилот-сигналу, может быть учтено путем введения поправки в одну из составляющих. Действительно, сигналы на выходе АЦП при наличии ошибки сдвига фаз имеют вид:

$$\begin{aligned} & \text{действительная составляющая} \\ & u_c = U_m \cos(\varphi(t) + \varphi_0); \end{aligned} \quad (11.20)$$

$$\begin{aligned} & \text{мнимая составляющая, сдвинутая на } \Delta\varphi \\ & u_s = U_m \sin(\varphi(t) + \varphi_0 + \Delta\varphi) = U_m \sin(\varphi(t) - \varphi_0) \cos \Delta\varphi + \\ & + U_m \cos(\varphi(t) + \varphi_0) \sin \Delta\varphi. \end{aligned} \quad (11.21)$$

При малой величине ошибки  $\Delta\varphi$  искажения корректируются поправкой

$$u_{s\_corr} = u_s - u_c \sin \Delta\varphi. \quad (11.22)$$



При всех калибровочных операциях должны, по возможности, задаваться параметры аппаратуры РСА, обеспечивающие максимальную точность измерений: тактовая частота АЦП, разрядность кодирования данных по амплитуде, частота повторения зондирующего сигнала (кроме режима калибровки угломестной ДНА).

### **11.7. Калибровка тракта обработки сигналов и выходного информационного продукта**

#### **Факторы, определяющие качество информационного продукта**

Процессор сигналов, реализующий синтез апертуры с заданными параметрами фокусирования и амплитудным взвешиванием для снижения уровня и интегральной энергии боковых лепестков является устройством с известным алгоритмом работы и прогнозируемым откликом. Контроль его работоспособности, как в процессе предполетной подготовки, так и в полете, осуществляется с применением контрольных задач, имитирующих условия радиолокационного обзора [261].

В ходе проектирования РСА принимаются технические решения, определяющие основные характеристики выходного информационного продукта и его качество. Термин «качество» широко употребляется, но не является строго определенным. Этим термином в данном контексте мы будем характеризовать совокупность особенностей РЛИ, влияющих на изобразительные и дешифровочные свойства РЛИ, не регламентированные усредненными характеристиками информационного продукта, такими как пространственное и радиометрическое разрешения, интегральный уровень боковых лепестков.

В частности, к особенностям, снижающим качество РЛИ, относится появление различных артефактов при наблюдении ярких объектов или фонов с большими контрастами. Это – «кресты», локальные области подавления, а также дефекты, связанные с формированием РЛИ (ложные изображения, модуляция яркости и др.).

**Технические решения**, влияющие на качество РЛИ, точность геометрических и радиометрических измерений по выходному информационному продукту, **должны включать в себя** следующие аспекты проектирования РСА:

- выбор системы координат для ориентирования лучей антенны в азимутальной плоскости: путевая или гринвичская система координат (ПСК) с поворотом плоскости лучей, используемая в современных РСА, в отличие от космических РСА первого поколения (SIR-A, Radarsat-1, JERS-1). Луч антенны направляют по нормали к вектору путевой скорости с учетом вращения Земли и прецессии орбиты, т.е. в ноль доплеровской частоты;
- снижение погрешности ориентации ДНА относительно ПСК, обеспечиваемое системами КА, наличие датчиков (например, астроблока) на борту КА, позволяющих оценить отклонения ДНА от ПСК до единиц угловых минут, измерение некомпенсированной ошибки ориентации и ввод ее значения в алгоритм синтеза РЛИ;
- использование систем позиционирования GPS или ГЛОНАСС для точного определения координат КА, особенно для интерферометрической обработки информации;

## Глава 11. Калибровка РСА

---

- коррекция миграции дальности, обеспечивающая минимальный уровень паразитной амплитудной модуляции сигнала по синтезируемой апертуре, вызванной компенсацией миграции дальности, особенно в прожекторном режиме работы РСА;
- способ учета смещения спектра доплеровских частот в ДНА (доплеровского центроида);
- снижение отклонения доплеровского центроида от нулевой частоты и зависимости от наклонной дальности при ошибках ориентации КА по курсу и тангажу, применение алгоритмов компенсации уходов во всем диапазоне углов визирования, что особенно критично в широкозахватных режимах Скансар;
- калибровка цифровых аттенуаторов в приемном канале, применяемых для уменьшения динамического диапазона сигналов в приемном тракте РСА;
- выбор формы ДНА в угломестной плоскости и частот повторения зондирующего сигнала, обеспечивающих минимальный уровень неоднозначности сигналов;
- выбор вида модуляции (ЛЧМ, ФМ) и формы спектра зондирующего сигнала, частотной характеристики приемного тракта, выбор тактовой частоты квантования сигнала по времени. Предпочтительно использование ЛЧМ-сигналов, не подверженных искажениям в широких пределах изменения доплеровской частоты, особенно в прожекторном и скошенном режимах обзора;
- согласование динамического диапазона принимаемого сигнала с разрядностью данных, передаваемых по радиолинии (управление цифровыми аттенуаторами, разрядность дискретизации сигнала в АЦП, применение методов сжатия информации, блочного адаптивного кодирования и др.);
- использование алгоритмов уточнения временной зависимости фазы принимаемого сигнала (автофокусировка). Введение поправок в параметры фокусированного синтеза РЛИ и некогерентного накопления;
- выбор алгоритма синтеза апертуры – непрерывный (простая свертка) или же кадровый (быстрая свертка, гармонический анализ) с коррекцией амплитудных искажений, вызванных формой азимутальной ДНА, в пределах синтезируемого кадра;
- выбор формы амплитудной весовой функции сжатия сигналов по дальности и азимуту (косинусоидальный, Кайзер, Хемминг и др.) для уменьшения интегрального уровня боковых лепестков отклика, их критичность к изменениям, вызванным погрешностями учета формы ДНА, остаточными ошибками дефокусировки, смещениями доплеровской частоты;
- выбор оптимальной разрядности вычислений на всех стадиях обработки сигналов, особенно для РСА с бортовой обработкой сигналов;
- коррекция геометрических и радиометрических искажений в выходном информационном продукте;
- выбор типа представления данных в выходном продукте, особенно при радиолокационных съемках для пополнения банка данных (в архив). Рекомендуется создание банка комплексных изображений, позволяющих использовать

данные для интерферометрической обработки (дифференциальная интерферометрия, поляриметрическая интерферометрия);

- архивирование сопроводительной информации: метеорологической обстановки, состояния морской поверхности, состояния ионосферы для коррекции ошибок;
- применение методов юстировки интерферометрической базы для однопроходной или многопроходной интерферометрии;
- архивирование данных предполетной наземной отработки РСА с выявлением параметров, подверженных изменениям во времени (влияние изменений температуры на фазовые характеристики сквозного тракта, выбор частоты и пр.).

### **Внутренняя калибровка тракта обработки**

Внутренняя калибровка тракта обработки реализуется в процессе предполетной подготовки методами имитационного моделирования, включающего набор ситуаций, типичных для радиолокационного обзора и позволяющих отработать и откалибровать алгоритмы сжатия сигналов по дальности и азимуту, канал ввода служебной информации и управление алгоритмами коррекции искажений.

Внутренняя калибровка тракта обработки в полете, как было отмечено выше, обеспечивает только контроль работоспособности соответствующих устройств и связей управления.

### **Внешняя калибровка тракта обработки**

Внешняя калибровка тракта обработки является процедурой интегральной оценки работы алгоритмов обработки информации, включая коррекцию искажений. Данные внешней калибровки должны подтверждать корректность функционирования всех звеньев РСА, а также выявлять дефекты, для диагностики которых используются все средства внутренней и внешней калибровки аппаратуры РСА.

*Внешняя калибровка тракта обработки и конечного информационного продукта* должны предусматривать:

- калибровку геометрии РЛИ и оценку точности измерения координат объектов, масштабов, внутренних задержек. Для проверки используются тестовые полигоны, а также сравнение РЛИ с крупномасштабными картами районов съемки;
- радиометрическую калибровку по эталонным отражателям (угловые отражатели, транспондеры), включая калибровку поляриметрических каналов;
- радиометрическую калибровку по измеренным полигонам природного характера (тропические леса, тайга);
- измерение формы отклика от точечных объектов (угловые отражатели, транспондеры) для уточнения весовых функций обработки и алгоритмов коррекции искажений;
- оценку интегрального уровня помех неоднозначности сигналов (по характерным объектам на местности);
- использование априорной картографической информации (топокарт, цифровых карт рельефа) для коррекции искажений, вызванных изменением площади элемента разрешения из-за изменения угла падения для поверхностей, имеющих наклон [314].

Эффективным способом контроля формы импульсного отклика РСА, позволяющим получить оперативную оценку разрешающей способности РЛИ, является применение локального алгоритма автофокусирования РГА, рассмотренного в подразделе 6.10.8.

Следует отметить, что операции по калибровке РСА весьма трудоемки, требуют выделения специального времени в программе полета, наличия соответствующего наземного обеспечения и создания специальной службы. Так, при эксплуатации РСА Radarsat-1 для своевременного формирования и поставки откалиброванных радиолокационных изображений было создано Канадское предприятие по обработке данных [343].

### 11.8. Состав наземного оборудования средств калибровки

*В состав наземного оборудования и калибровочных средств* должны входить:

- точечные пассивные отражатели, например, уголковые отражатели;
- активные калибраторы – приемопередатчики (транспондеры), создающие эталонные цели со строго определенными параметрами;
- поверхностно-распределенные цели с известными и постоянными значениями УЭПР, к таким эталонным участкам, в частности, относятся участки тропического леса в Южной Америке;
- измерительные приемники для калибровки антенн и излучаемой мощности;
- эталонные шумовые передатчики со ступенчатым изменением мощности шума для калибровки приемного тракта РСА.

*К основным техническим характеристикам указанных средств* относятся:

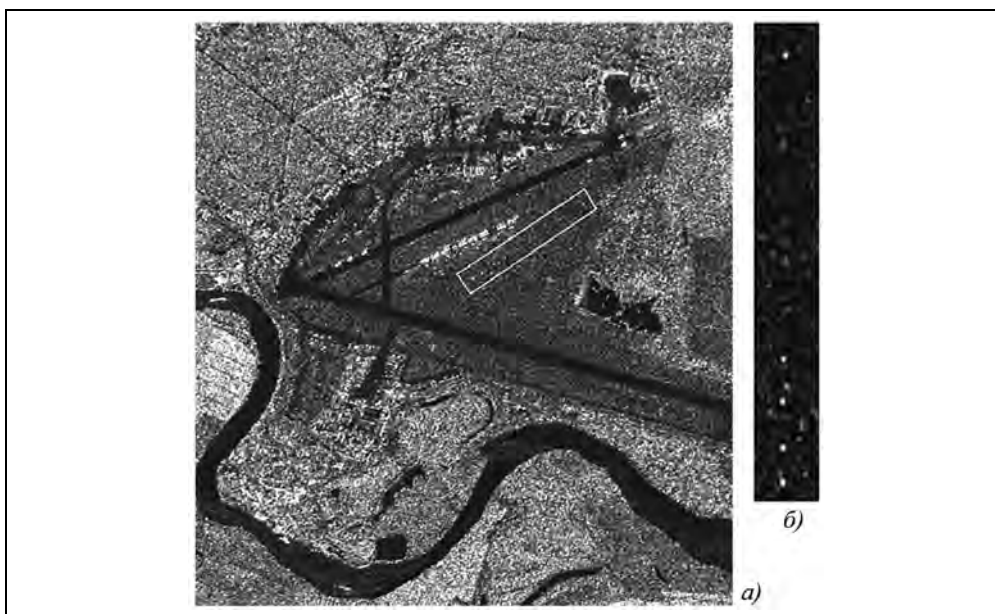
- диапазон углов наблюдения, в пределах которого сохраняется заданное значение ЭПР конкретного калибровочного средства (поэтому уголковые отражатели с треугольными гранями предпочтительнее, хотя и имеют меньшую ЭПР, чем отражатели с квадратными гранями);
- вероятность и степень искажений диаграммы обратного рассеяния при попадании на его апертуру сигналов, переотраженных от подстилающей поверхности или окружающих объектов (измерительные полигоны в США оборудуют на высохших соляных озерах, уголки устанавливают на высоких опорах, что обеспечивает малые переотраженные сигналы или их отстройку от основного сигнала);
- степень выраженности краевых эффектов.

*При выборе ЭПР-отражателей необходимо соблюдать следующие условия:*

- минимальная ЭПР должна быть на уровне чувствительности РСА;
- максимальная ЭПР должна обеспечивать насыщение приемника;
- в пределах максимальной и минимальной ЭПР должны быть еще не менее трех градаций ЭПР;
- для получения статистических оценок с высокой точностью необходимо устанавливать серии отражателей, имеющих одинаковую ЭПР;

- расстояния между отражателями должны не менее чем в 2-3 раза превышать интервал разрешения РСА;
- размещать эталонные отражатели следует на слабо отражающем фоне — асфальте, бетоне, водной поверхности без волнения (озеро), в пустыне или на радиопоглощающем покрытии;
- для получения требуемой точности калибровки должно обеспечиваться высокое отношение сигнал/фон.

На рис. 11.16 приведен пример наблюдения миры угловых отражателей, снятой с помощью РСА SIR-C/X-SAR в С-диапазоне волн (фрагмент снимка, рис. 2.1) в ходе экспериментов, проведенных фирмой JPL, США совместно с НПО машиностроения и НПО «Вега», СССР.



**Рис. 11.16.** РЛИ аэродрома Жуковский в С-диапазоне волн (SIR-C) с тестовой миной (а); увеличенное РЛИ угловой миры (б)

*Активные радиолокационные калибраторы (транспондеры)* – устройства принимающие, усиливающие и переизлучающие сигнал с сохранением его когерентности. Только они позволяют калибровать РСА с низким разрешением (50...100 м). Применение усилителя мощности в калибраторе позволяет использовать слабо-направленные антенны. Давая мощные отметки на РЛИ, транспондеры используются для радиометрической и геометрической (уточнения параметров орбиты) калибровки РСА.

*Наземные антенные рефлекторы* с большой эффективной отражающей площадью являются эффективной альтернативой традиционно используемым пассивным и активным средствам калибровки [81]. С этой целью конструкция параболической антенны

ческих рефлекторов дорабатывалась с установкой в фокальной плоскости пассивного отражателя в виде проводящего диска или поляризационной решетки. Такая операция обеспечивает расширение диаграммы обратного рассеяния антенны, что снижает требования к точности наведения антенны на КА.

В ходе совместных экспериментов, проведенных ОКБ МЭИ, ИРЭ РАН с РСА ENVISAT, было подтверждено, что поляризационная матрица отражения доработанной антенны с установленным дисковым отражателем эквивалентна матрице рассеяния сферы. Антенна с поляризационной решеткой ведет себя как диполь, так что ЭПР на согласованной поляризации  $xx$  равна  $\sigma_{xx} = \sigma_{\max} \cos^4 \theta$ , а на перекрестной поляризации  $xy$ :  $\sigma_{xy} = \sigma_{\max} \cos^2 \theta \sin^2 \theta$ , где  $\theta$  – угол между ориентацией элементов поляризационной решетки и плоскостью поляризации радиоволны. ЭПР антенны с диаметром 4,7 м на волне 5,6 см равен 59 дБм при фазовой стабильности, составляющей (0,013...0,05) от длины волны РСА.

*Поверхностно распределенные эталонные цели* – это тропические леса бассейна реки Амазонки. Для них характерны следующие параметры:  $\sigma^0 = -5,9$  дБ при вертикальной поляризации на частоте 14,3 ГГц, среднее квадратичное отклонение УЭПР при углах падения  $44^\circ$ , включая суточные изменения – в пределах 0,6...0,9 дБ.

### 11.9. Радиометрическая коррекция радиоголограммы при работе быстродействующей АРУ

Рассмотренные выше методы калибровки элементов радиолокационного тракта РСА были отработаны в ходе эксплуатации РСА «Меч-КУ» в составе КА «Алмаз-1». Аппаратура «Меч-КУ», краткое описание которой приведено в подразделе 13.3.3, имела ряд особенностей в технических решениях, которые отличали ее от зарубежных РСА. Это приводило к отличиям в процедурах калибровки РСА и коррекции искажений в выходном информационном продукте.

*Основные технические отличия аппаратуры «Меч-КУ»* состоят в следующем:

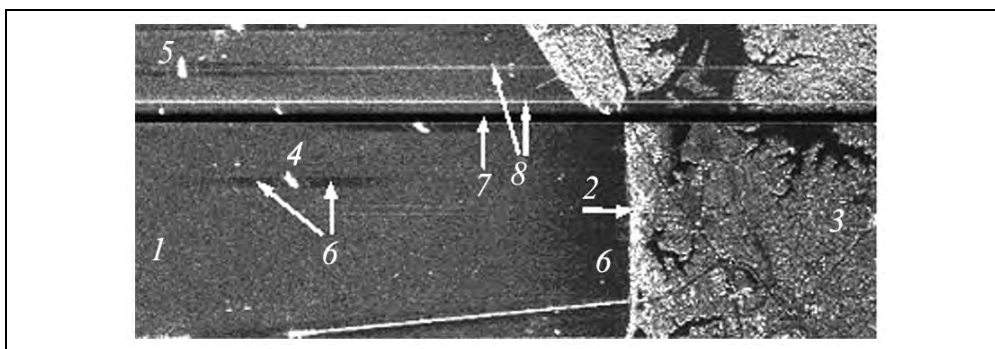
- использовался зондирующий сигнал в виде мощного короткого импульса, длительностью 0,07 мкс (или 0,1 мкс) с пьедесталом длительностью 0,8 мкс и относительным уровнем около минус 25 дБ вместо обычных длинных импульсов с ЛЧМ-модуляцией. При коротком сигнале более заметно влияние ограничения амплитудной характеристики УПЧ при наблюдении компактных целей (судов) на равномерном фоне (морской поверхности);
- для сжатия динамического диапазона сигнала в приемнике использовалось аналоговое АРУ вместо цифровых аттенюаторов, управляемых по командам или программе с фиксацией их затухания в служебной информации строки данных для восстановления уровня сигнала перед синтезом РЛИ;
- использовались два режима АРУ: медленный режим АРУ с постоянной времени 3 с, превышающей время пролета зоны по азимуту, облучаемой антенной РСА (измерительный режим, допускающий внешнюю радиометрическую калибровку), и режим (основной) быстродействующей АРУ с малой постоянной

### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

ной времени около 30 мкс, позволяющей сжать динамический диапазон сигналов на входе АЦП и улучшить изобразительные свойства РЛИ, но ценой потери измерительных свойств РЛИ.

В данном разделе рассматривается последовательность процедур, позволяющих устранить радиометрические искажения в РЛИ при съемках в режиме быстродействующей АРУ и, тем самым расширить возможности использования архивных материалов радиолокационной съемки РСА «Меч-КУ» для ряда практических приложений, в том числе для моделирования перспективных РСА, а также для формирования тестовых сигналов, применяемых при сквозном контроле РСА в стендах полунатурного моделирования.

Фрагмент РЛИ, полученный при стандартном синтезе радиоголограммы РСА «Меч-КУ» в режиме быстродействующего АРУ, показан на рис. 11.17. Отображаются слабо взволнованная морская поверхность 1, участки суши вблизи 2 и вдали 3 от берега, яркие отметки от судов 4, 5, а рядом с ними и сушей, вызванные нелинейностями области подавления слабых сигналов от моря 6. На снимке видна «мертвая зона» 7 в момент излучения импульсов и калибровочные импульсы 8.



**Рис. 11.17.** Радиолокационные изображения в режиме быстродействующей АРУ. Стандартный алгоритм синтеза

(Порт Норфолк, США; РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»; фрагмент маршрута 2365н, разрешение ~10 м)

Зоны подавления 6 сигналов, отраженных от морской поверхности, имеют размеры по азимуту, равные ширине области облучения антенной радиолокатора. По дальности их размер равен размерам яркого объекта (в предположении, что они превышают разрешение РСА по дальности ~10 м). От корабля 5 наблюдаются две темные полосы подавления сигналов от моря, вызванные мощными сигналами от корабельных надстроек.

Рассмотренные эффекты подавления сигналов от моря компактными объектами типичны для РСА с зондирующим сигналом в виде коротких импульсов (см. также рис. 7.36, а). Для РСА, использующих широкополосные зондирующие импульсы большой длительности, зона подавления по дальности расширяется, но глубина контраста уменьшается обратно пропорционально отношению ЭПР объекта к ЭПР моря в размерах мгновенной зоны облучения. Для участков РЛИ вблизи береговой линии характеры изображений близки в обоих случаях зондирующего сигнала.

## Глава 11. Калибровка РСА

Характерен факт, что при использовании быстродействующей АРУ изображения суши и морской поверхности (вдали от береговой линии) имеют практически одинаковую яркость. Это облегчает обнаружение слабых отметок от малых судов, а также неравномерностей отражения от моря, вызванных течениями и загрязнениями. В прибрежной зоне передается реальный контраст вода/суша. При этом модуляция яркости изображения морской поверхности не обнаруживается (темное поле), а сигналы от суши попадают в область ограничения.

Структурная схема коррекции радиометрических искажений в цифровой радиоголограмме (ЦРГ), вызванных нелинейностями и работой быстродействующей АРУ применительно к обработке радиоголограмм РСА «Меч-КУ», приведена на рис. 11.18. Первым шагом {1} является коррекция нелинейности амплитудной характеристики приемника согласно разделу 11.6.

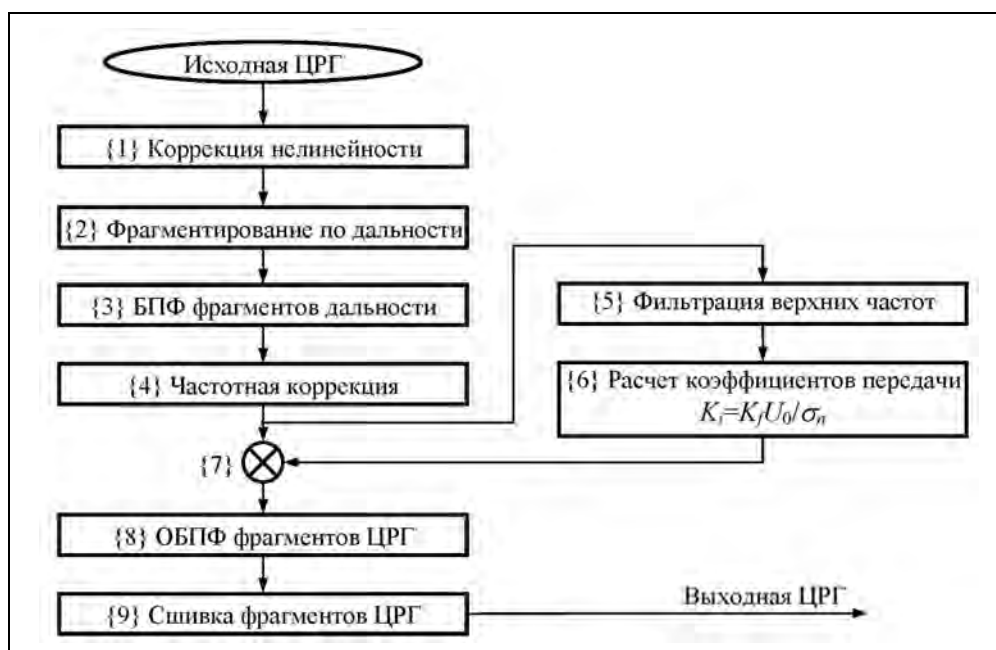


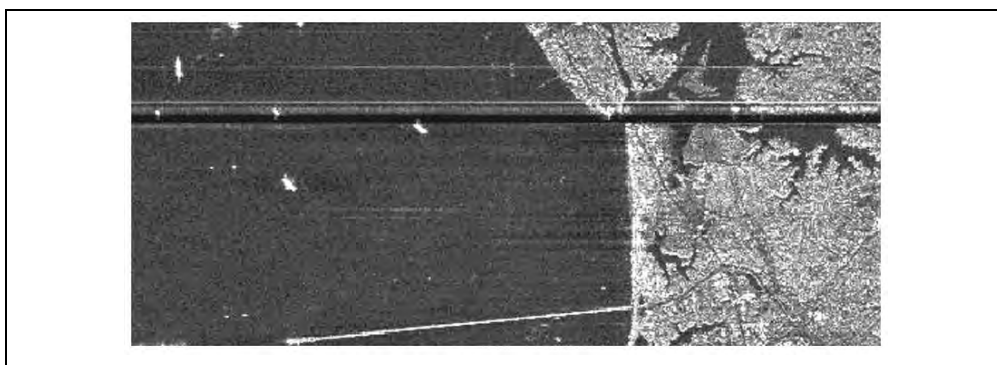
Рис. 11.18. Структурная схема радиометрической коррекции радиоголограммы

Следующий шаг {2} – разделение ЦРГ на фрагменты (32 или 64 отсчета), длительность которых в 3–4 раза меньше постоянной времени АРУ. Далее следует БПФ фрагментов ЦРГ по дальности {3} и частотная коррекция искажений спектра сигнала {4}, вызванных пьедесталом в зондирующем импульсе (см. раздел 11.6). Затем выполняют главные процедуры {5, 6} коррекции радиометрических искажений, вызванных применением быстродействующей АРУ. Они основаны на том, что в линейном тракте с постоянным коэффициентом передачи принятые сигналы от местности и шумы приемника независимы. Спектр зондирующего импульса, особенно в случае ЛЧМ-модуляции, имеет практически прямоугольную форму. Частотная ха-



рактика широкополосного УПЧ, как правило, имеет плавные склоны (с «хвостами») и полоса спектра шума несколько перекрывает спектр полезного сигнала.

Изменение уровня сигнала в линейном тракте не приводит к изменению спектра шумов, в том числе и в области «хвоста» частотной характеристики УПЧ. При работе АРУ по суммарному сигналу изменяется коэффициент усиления УПЧ и меняется мощность шума, в том числе и в области «хвоста». Поэтому, измеряя в записанной радиоголограмме мощность шумов в этой области, можно оценить изменения коэффициента усиления, вызванные действием АРУ и ввести множитель, компенсирующий эти изменения в спектре суммарного процесса сигнал+шум, шаги {6, 7}. Далее следует обратное преобразование Фурье {8} по фрагментам ЦРГ и сшивка фрагментов {9} для получения выходной радиоголограммы с радиометрической коррекцией. Синтезированное по этой радиоголограмме РЛИ приведено на рис. 11.19.



**Рис. 11.19.** РЛИ, синтезированное по радиоголограмме после радиометрической коррекции

Исправленное РЛИ с устраненными артефактами, вызванными нелинейностями и работой быстродействующего АРУ, передает относительные контрасты ЭПР наблюдаемых объектов и местности с добавлением мощности шумов. РЛИ пригодно для проведения внутренней калибровки по встроенным датчикам, определяющим чувствительность РСА, а также для внешней калибровки по объектам с известной ЭПР или земным покровам с известной УЭПР, находящимся на снятом участке или в снимках эталонных участков, полученных с небольшим интервалом времени относительно данного кадра и обработанных по такой же технологии радиометрической коррекции.

Рассмотренная технология коррекции радиометрических искажений может быть применена также в сочетании с цифровым АРУ, изменяющим коэффициент усиления УПЧ по всей строке дальности. Это может понадобиться для коррекции ограничения сигналов при съемке местности с большим перепадом контрастов – море/горы, если методы адаптивного квантования, усложняющие бортовую аппаратуру, не применяются.

---

## Глава 12

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗЕМЛЕОБЗОРА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

#### 12.1. Системный подход к проектированию космической аппаратуры радиолокационного наблюдения

Обобщение отечественного и зарубежного опыта создания и применения космической аппаратуры РЛН позволило сформулировать системный подход к проектированию космических РСА. Он рассматривает РСА как замкнутую систему радиолокационного наблюдения (СРЛН), включающую в себя бортовой и наземный сегменты. В отличие от традиционного подхода к проектированию системы, исходя из требований конкретного технического задания (ТЗ), этот подход рассматривает требования ТЗ как минимально необходимые исходные данные. Окончательный облик аппаратуры, ее характеристики, режимы работы должны определяться на основе анализа возможностей КА (с учетом ожидаемых запасов по параметрам), требований потенциальных потребителей, методов дешифрирования и тематической обработки информации, ожидаемой товарной стоимости выходного информационного продукта, перспектив совершенствования элементной базы [226, 493\*].

*Данный подход рассматривает любые космические РСА как системы двойного применения* и оценивает эффективность их использования для решения военных, народнохозяйственных и научных задач, независимо от основного назначения разрабатываемой аппаратуры. В ходе проектирования должны приниматься ключевые решения (выбор диапазона волн, типа и размеров антенны, типа передатчика, распределение функций космического и наземного сегментов и т.д.), с учетом которых в остальные устройства и в режимы работы аппаратуры закладываются технические запасы, обеспечивающие повышение информативности СРЛН в целом.

*Информативность СРЛН* трактуется в широком смысле, это:

- повышение качества и информативности получаемых данных;
- повышение оперативности наблюдения;
- расширение круга задач, решаемых с использованием радиолокационной съемки;
- совместная обработка данных разных информационных каналов;
- совершенствование технологии создания аппаратуры РЛН;
- создание научно-технического задела для совершенствования аппаратуры, методов обработки информации и проектирования перспективных систем, а также информационное обеспечение разработок перспективных СРЛН.

Принимаемые технические решения основываются на новейших достижениях в электронной базе, вычислительной техники, космических технологий. В данной главе рассмотрены пути построения и тенденции развития основных функциональных устройств, входящих в состав бортовой аппаратуры радиолокационного землеобзора космического базирования. Это, в первую очередь, антенные устройства, формирователи опорных частот и сигналов, передающие и приемные устройства.

Направления перспективных разработок и исследований, как правило, относятся к созданию РСА космического базирования универсального применения. Но есть и проекты специализированных РСА для решения частных задач, например, контроля ледового покрова, измерения подвижек земной коры и т.д. Прорабатывается облик перспективных бистатических систем дистанционного зондирования, высокоорбитальных РСА, аппаратуры с применением сверхширокополосных сигналов [352, 354, 427\*, 439\*].

Продуктивно совмещение аппаратуры для решения разных задач, например, введения режима зондирования участков морской поверхности, как в РСА ERS-1/2, ASAR/ENVISAT, скаттерометра, как в РСА ERS-1/2 или совмещение РСА с СВЧ-радиометром [414].

## **12.2. Антенные устройства космических РСА**

### **12.2.1. Общие требования к антеннам для космических РСА**

Основные требования к антенным устройствам для РСА космического базирования – это, в первую очередь, большая эффективная площадь, обеспечивающая высокий энергетический потенциал и снижение помех неоднозначности принимаемых сигналов, конструктивные требования, связанные с размещением антенн на КА и необходимостью их раскрытия после вывода КА на орбиту [21\*, 131\*–133\*, 206\*, 208\*].

Используют **антенны разных типов** (см. гл. 13):

- волноводно-щелевые антенны с неуправляемым лучом;
- фазированные антенные решетки (ФАР) с электронным сканированием благодаря использованию управляемых фазовращателей или коммутаторов запитывающих устройств;
- активные фазированные антенные решетки (АФАР) со сканированием по углу места и по курсу, а также применением цифрового формирования ДНА [325, 511];
- зеркальные антенны зонтичного типа;
- гибридные зеркальные антенны с облучателями в виде антенной решетки;
- гибридные зеркальные антенны с АФАР-облучателями (АФАР-ГЗА).

В большинстве современных РСА предусматривают поляриметрические режимы зондирования. Они реализуются путем переключения поляризаций излучаемого сигнала на линейную горизонтальную (Г) или вертикальную (В). Прием ведут двумя независимыми каналами для волн обеих поляризаций Г и В. Таким же образом осуществляется прием сигналов в случае применения круговой поляризации излучения. Необходимо обеспечение максимально возможной (по конструктивным соображениям) площади антенны (особенно для дециметровых диапазонов волн) и наличие

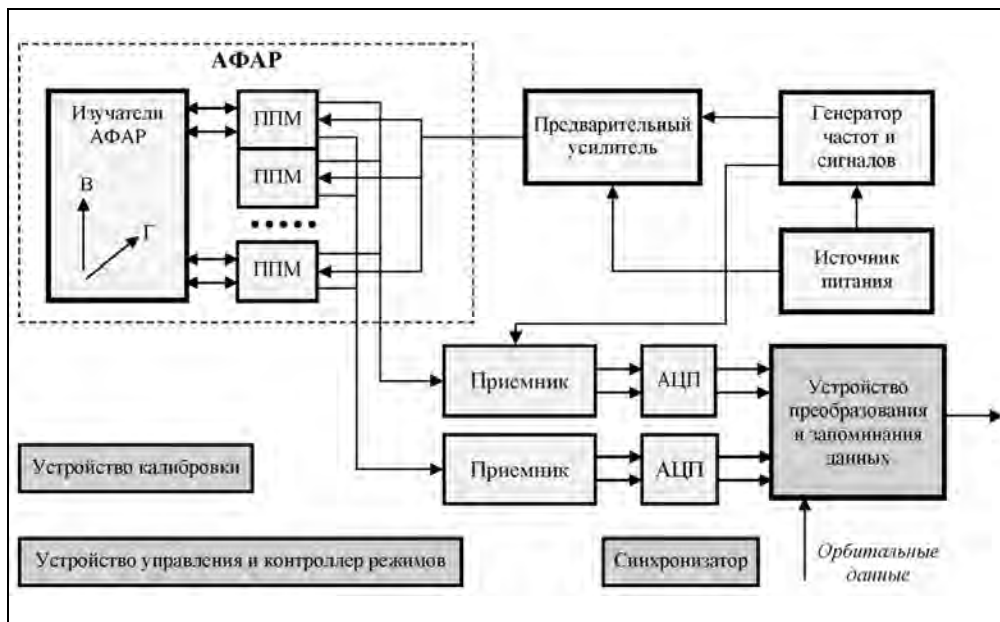
электронного сканирования в широких пределах по углу места (а также по азимуту – для работы в прожекторном режиме или в режиме скошенного обзора) [223\*, 251].

Перспективными вариантами построения антенных устройств являются активные фазированные антенные решетки (в том числе многочастотные АФАР), гибридные сканирующие зеркальные антенны, а также гибридные зеркальные антенны с АФАР-облучателями (АФАР-ГЗА).

Принципы построения АФАР широко известны. Поэтому мы остановимся на особенности технических решений применительно к АФАР для перспективных космических РСА. Отдельный раздел будет посвящен сканирующим антенным решеткам для сверхширокополосных видеоимпульсных РСА.

**12.2.2. АФАР для космического РСА X-диапазона волн**

Структурная схема РСА с антенным устройством типа АФАР приведена на рис. 12.1. АФАР многофункционального РСА должна обеспечивать радиолокационную съемку участков поверхности Земли в обзорном режиме с перенацеливанием полосы съемки, режиме Скансар с программным изменением ширины луча в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты (или продольной оси КА), а также съемку в прожекторном режиме с электронным управлением положением луча в наклонной плоскости, касательной к орбите. Во всех режимах должен обеспечиваться одновременный прием сигналов на двух ортогональных линейных поляризациях при поочередном изменении поляризации в режиме передачи. При этом развязка поляризационных каналов должна быть не менее 25 дБ [38\*, 131\*].



**Рис. 12.1.** Структурная схема РСА с антенным устройством типа АФАР

По требованиям однозначности сигналов по азимуту и дальности при высоте орбиты около 500 км размеры антенны должны составлять примерно  $6,0 \times 0,8$  м. По сравнению с антенной TerraSAR-X, имеющей размеры  $4,8 \times 0,8$  м, желателен запас по частоте повторения зондирующего сигнала с целью расширения полосы обзора в сторону больших углов падения, а также для увеличения энергетического потенциала.

Для работы РСА в указанных режимах АФАР должна иметь следующие основные характеристики. Ширина главного лепестка ДН в вертикальной плоскости (по углу места) должна принимать одно из четырех значений 2, 4, 6 и  $8^\circ$ , а в наклонной плоскости (вдоль линии пути) составлять около  $0,3^\circ$ . Сектор электронного сканирования луча в вертикальной плоскости должен составлять  $\pm 10 \dots 15^\circ$ , а в горизонтальной – несколько единиц градусов. При этом погрешность установки луча в заданном направлении в этой плоскости не должна превышать нескольких сотых долей ширины главного лепестка ДН. АФАР в режимах приема и передачи должна обеспечивать работу с сигналами, ширина спектра которых составляет несколько сотен мегагерц при средней мощности более 200 Вт и импульсной мощности более 5 кВт. Составные части АФАР должны работать в условиях открытого космоса с циклическим изменением температуры в широких пределах.

Для работы на двух поляризациях с требуемой развязкой в АФАР целесообразно использовать двухполяризационные излучатели (ДПИ), предложенные в работе [346], и состоящие из двух отрезков тонкостенного прямоугольного волновода, один из которых имеет щели на широкой, а второй – на узкой стенке волновода. Узкая стенка волновода с продольными щелями примыкает по всей длине к широкой стенке волновода с поперечными щелями. Волноводы с щелями на широкой стенке обеспечивают работу АФАР на вертикальной поляризации, а волноводы с щелями на узкой стенке – на горизонтальной поляризации. Такие излучатели имеют наименьшие потери по сравнению с другими типами излучателей.

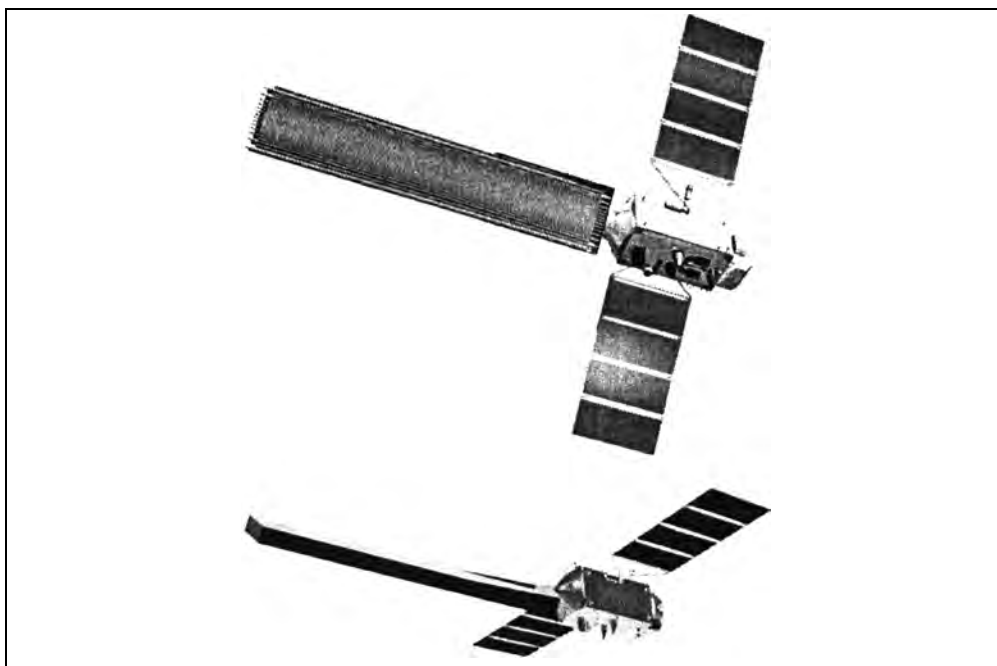
В рассматриваемой АФАР предусмотрены приемопередающие модули (ППМ), имеющие один передающий и два приемных канала. Число ППМ равно числу ДПИ, причем каждый ППМ постоянно соединен со своим излучателем. Передающий канал ППМ поочередно подключается к одному из волноводов соответствующего ДПИ с помощью рп-диодного коммутатора, а приемные каналы подключаются к этим волноводам одновременно. Управление работой модуля осуществляется с помощью микропроцессора, входящего в состав ППМ.

Антенная решетка имеет плоское прямоугольное излучающее полотно, длина которого в раскрытом состоянии составляет около 6 м, причем длинная сторона полотна располагается вдоль линии полета. Полотно состоит из панелей с размерами около  $2,0 \times 0,8$  м. В транспортном положении панели укладываются друг на друга.

Силовую основу конструкции составляют плоские трехслойные панели толщиной около 15 мм с металлотетовым заполнением между тонкими дюралевыми листами. Расположение элементов на обеих сторонах панелей выполнено таким образом, чтобы минимально ослаблять конструкцию сквозными отверстиями для прокладки кабелей и жгутов. Со стороны АФАР, не закрываемой экрановакуумной тепловой изоляцией (ЭВТИ), расположены антенные модули, состоящие из ДПИ и

ППМ. С обратной стороны АФАР, закрываемой ЭВТИ, располагаются источники питания, блоки управления и контроля.

На основе исследований радиотехнических характеристик АФАР, выполненных в ОАО «Концерн «Вега» совместно с ОАО «ВПК «НПО машиностроения», разработан проект АФАР, размещаемой на борту малого космического аппарата, облик которого представлен на рис. 12.2.



**Рис. 12.2.** РСА X-диапазона волн с АФАР на малом космическом аппарате

Характеристики приемопередающих модулей, их параметры, а также интегральные параметры АФАР X- и L-диапазонов волн и расчетные формы диаграмм направленности приведены в [131\*, 132\*].

### **12.2.3. Совмещенная двухдиапазонная АФАР L- и P-диапазонов волн**

Разработка дециметровых каналов бортового комплекса «Спинар-1ДМ» для космического аппарата «Аркон-2» НПО им. С.А. Лавочкина [125, 548] привела к целесообразности создания совмещенного двухдиапазонного антенного полотна с кратными рабочими длинами волн  $\lambda=23$  см и  $\lambda=69$  см [131\*, 132\*]. Размеры антенны составляют  $12 \times 3,3$  м.

Антенное устройство представляет собой совмещенную в единой конструкции АФАР. Решетки L- и P-диапазонов могут работать на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Излучатели L- и P-диапазонов размещены на двух складывающихся панелях с размерами в раскрытом состоянии  $12,0 \times 3,3$  м. Излучатели L-диапазона представляют собой совмещенные маловыступающие крестообразные

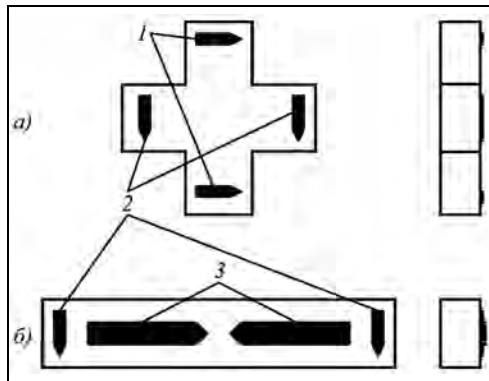


Рис. 12.3. Двухполяризационные излучатели  $L$ - и  $P$ -диапазонов волн

излучатели резонаторного типа с полосковыми возбуждателями горизонтальной 1 и вертикальной 2 поляризации (показаны на рис. 12.3, а). Излучатели  $P$ -диапазона (рис. 12.3, б) – совмещенные в одной конструкции вибраторная 3 и резонаторная антенны с полосковыми возбуждателями 2.

Фазированная антенная решетка  $L$ - и  $P$ -диапазонов должна обеспечивать перенацеливание луча по углу места в заданный район радиолокационной съемки Земли в различных режимах наблюдения (маршрутный, Скансар, про-

жекторный и др.). Для этого используется около 400 приемопередающих модулей (ППМ), каждый из которых состоит из *pin*-диодного фазовращателя, токовых ключей, схемы контроля микропроцессора и соответствующей системы управления. При этом ФАР имеет следующие расчетные значения параметров: коэффициент усиления в зависимости от режима от 33 до 35 дБ, ширина ДН по уровню минус 3 дБ в горизонтальной плоскости  $1,2^\circ$  и в вертикальной плоскости (в зависимости от режима) от 5 до  $7,5^\circ$ , сектор электронного сканирования в горизонтальной плоскости  $6^\circ$  и в вертикальной плоскости  $23^\circ$ . Для  $P$ -диапазона в виду в три раза большей ширины луча его положение фиксировано.

Антенная решетка  $P$ -диапазона имеет расчетный коэффициент усиления 26 дБ, ширину главного лепестка ДН по уровню минус 3 дБ в горизонтальной плоскости  $3,6^\circ$  и в вертикальной плоскости  $11^\circ$ .

#### 12.2.4. Гибридная зеркальная антенна $S$ -диапазона волн для РСА в составе малого космического аппарата

Антенное устройство космического РСА  $S$ -диапазона, размещаемого на борту малого космического аппарата, выполнено в виде гибридной зеркальной антенны (ГЗА), состоящей из рефлектора и электронно-управляемой решетки из 32 излучателей, расположенной в фокальной плоскости рефлектора вдоль одной из осей зеркала. Решетка излучателей может поворачиваться на  $90^\circ$ , позволяя реализовать сканирование лучом в вертикальной или горизонтальной плоскостях. ГЗА позволяет устанавливать луч в заданном секторе углов в любое из 25 угловых положений с угловым интервалом, равным 0,2 от ширины главного лепестка диаграммы направленности (ДН) по уровню минус 3 дБ, и обеспечивает быстрое перенацеливание луча в различных режимах радиолокационной съемки, в том числе и в прожекторном режиме.

Гибридная зеркальная антенна имеет следующие расчетные значения параметров: коэффициент усиления на средней частоте 32 дБ, угловой сектор сканирования  $4,5^\circ$  в выбранной плоскости, ширина ДН по уровню минус 3 дБ составляет  $1^\circ$ , уровень пересечения парциальных ДН 0,1 дБ, уровень ближних и дальних боковых лепестков ДН не более минус 20 и минус 25 дБ соответственно.

## Глава 12. Совершенствование аппаратуры радиолокационных комплексов ...

Рефлектор ГЗА является вырезкой из параболоида с фокусным расстоянием 4 м, имеет шестигранный контур с диаметром вписанного круга 6 м и представляет собой складывающуюся ферменную конструкцию, на которой закреплена металлическая сетка. Рефлектор антенны выполнен из сетчатого полотна (рис. 12.4). В раскрытом состоянии он имеет площадь раскрыва 32 м<sup>2</sup>, среднеквадратичное отклонение от поверхности параболоида не более 3 мм. Масса ГЗА 86 кг, из которых 51 кг составляет масса рефлектора. Общий вид антенны на испытательном стенде в безэховой камере показан на цветной вкладке в конце книги рис. Ц.8.

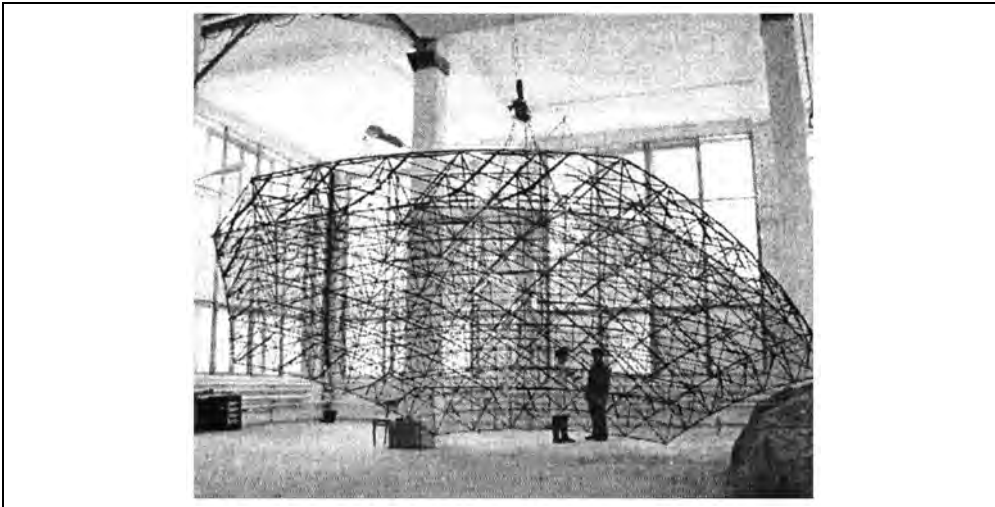


Рис. 12.4. Рефлектор гибридной зеркальной антенны космического РСА

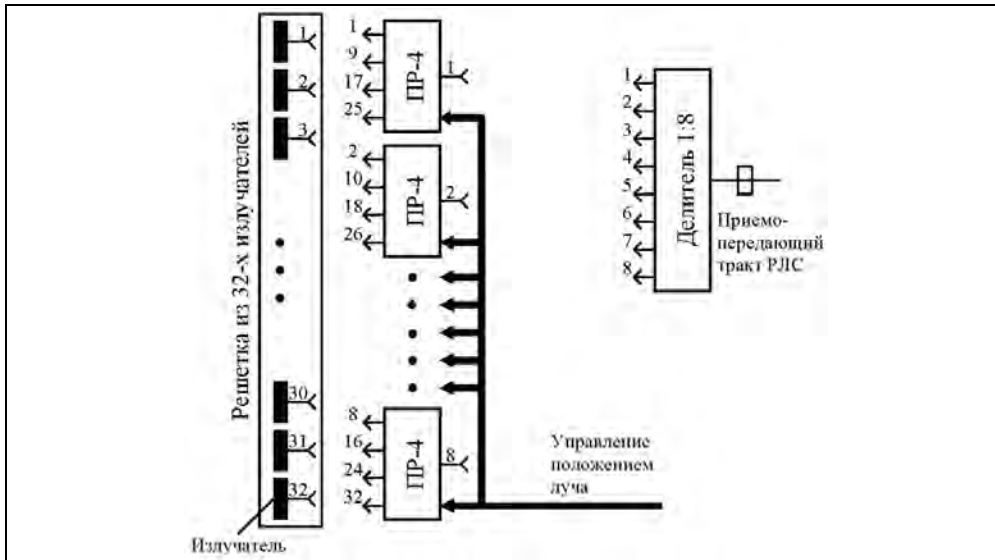


Рис. 12.5. Функциональная схема переключателя зон обзора



Электронное управление лучом ГЗА осуществляется с помощью переключателя зон обзора, включающего восемь полупроводниковых СВЧ-переключателей на четыре канала ПР-4 и полосковый делитель 1:8 (рис. 12.5). Выходы переключателей соединены с входами 32 излучателей. Соответствие входов излучателей и выходов переключателей ПР-4 показано цифрами 1...32.

Для формирования каждого из лучей к приемопередающему тракту РСА подключается группа из восьми соседних излучателей. Переключатель зон обзора расположен вблизи решетки излучателей и соединен с РСА складывающимся волноводным трактом длиной 7,3 м, включающим три вращающихся соединения.

В рассмотренной антенне плоскости поляризации на передачу и прием (ГГ или ВВ) реализуются путем разворота линейки с излучателями. В патенте [172\*] предложена модификация схемы облучающего устройства с реализацией поляриметрических (ГГ+ГВ или ВВ+ВГ) режимов работы.

#### **12.2.5. Гибридная зеркальная антенна с АФАР-облучателем**

Дальнейшее развитие гибридных зеркальных антенн состоит в использовании в облучателе распределенной системы в виде приемопередающих модулей (ППМ). Такой вариант имеет значительные преимущества перед рассмотренным выше, поскольку исключаются потери при суммировании мощности сосредоточенного передатчика и при коммутации лучей, возможно более плавное сканирование лучом за счет изменения не только фазового, но и амплитудного распределения поля по апертуре облучателя. Поляриметрический режим работы антенны осуществляется путем установки переключателей поляризаций внутри ППМ. Конструкция антенны значительно упрощается, так как устраняется СВЧ-тракт между передатчиком и входами антенного переключателя, уменьшаются общие потери в тракте.

Применение гибкого управления фазой и амплитудой сигналов в ППМ (в отличие от обычных АФАР с управлением только фазой сигналов) позволяет в такой гибридной зеркальной антенне (АФАР-ГЗА) корректировать ошибки геометрии антенны и расширять углы сканирования ДНА.

В АФАР-ГЗА высокая направленность достигается за счет рефлекторов больших размеров, а электронное сканирование луча в пределах единиц градусов обеспечивается облучателями в виде антенных решеток. При больших размерах рефлектора такой сектор сканирования может составлять десятки и даже сотни ширин луча, а облучатель должен формировать поле, существенно отличающееся от сферической волны [58, 103, 206\*].

Известны два основных типа гибридных зеркальных антенн [103]. В ГЗА первого типа возбуждается вся решетка, а на зеркале используется лишь часть поверхности, формирующая луч, отклоненный в определенном направлении. В гибридных антеннах второго типа (АФАР-ГЗА) поверхность рефлектора используется полностью, а формирование отклоненного луча обеспечивается за счет возбуждения определенного участка (кластера) на облучающей решетке. При сканировании кластер перемещается, а его размеры и закон возбуждения – изменяются.

В отличие от ГЗА первого типа гибридные антенны второго типа (АФАР-ГЗА) обладают высоким коэффициентом использования поверхности (КИП) рефлектора,

что определяет их преимущества при создании антенн с дорогостоящими крупногабаритными раскладными рефлекторами. Однако они требуют применения облучающих решеток, имеющих управление, как фазами, так и амплитудами сигналов в каналах.

Для этого в ППМ, входящих в состав АФАР-облучателя рефлектора, в передающем канале применяют СВЧ-усилители с регулировкой выходной мощности. Наличие в передающих и приемных каналах ППМ фазовращателей и аттенюаторов позволяет включать нужный кластер и формировать внутри него требуемое амплитудно-фазовое распределение.

При проектировании АФАР-ГЗА для космического РСА можно применять офсетную конструкцию рефлектора и располагать полный профиль рефлектора в вертикальной (угломестной) плоскости, где требуется максимальный угол сканирования ДНА, а сечение с вырезкой параболоида – вдоль линии пути, где углы сканирования составляют несколько размеров ДНА. Общий вид АФАР-ГЗА для двухчастотного космического РСА «Смотр-SP» приведен в подразделе 13.5.12.

#### **12.2.6. Активные антенные решетки и их элементы для видеоимпульсных РСА**

Применение сверхкоротких видеоимпульсных сигналов (СКВИ) открывает перспективу создания РЛС нового поколения. Как уже отмечалось, преимущества видеоимпульсных РСА (ВИРСА) состоят в том, что использование широкого спектра зондирующего импульса от метрового диапазона до диапазонов традиционных РСА позволяет получить новую информацию об объектах, в том числе и под растительным покровом. Важными проблемами, которые приходится решать при создании антенных устройств для ВИРСА, являются выбор типа излучателя, комплексирование его в сканирующую антенную решетку и обеспечение управления лучом посредством изменения задержек между излучателями. Применительно к космическим РСА задача осложняется тем, что площадь антенны должна обеспечивать однозначность передачи сигнала, а объем антенного устройства зависит от протяженности излучателей по нормали к площади антенны [21\*, 247\*].

Проведенный анализ возможностей реализации ВИРСА космического базирования показал, что оптимальный диапазон частот спектра зондирующего сигнала находится в пределах от 160...200 до 1300 МГц [272, 427\*]. Такой выбор нижней границы спектра позволяет реализовать подповерхностное зондирование, не слишком увеличивая размеры антенны ВИРСА. Верхняя граница включает используемый в обычных узкополосных РСА *L*-диапазон волн (и перспективный *P*-диапазон), что позволит сравнивать результаты широкополосного и узкополосного зондирования (радиолокационная спектральная съемка), расширяя тем самым информацию об объектах наблюдения.

Современные полупроводниковые приборы позволяют генерировать импульсы длительностью порядка наносекунды и менее. Наряду с высокочастотными составляющими спектр видеоимпульса включает и большую часть энергии в низкочастотной области сотен мегагерц. Благодаря таким свойствам видеоимпульсный

локатор имеет одновременно высокую как разрешающую, так и проникающую способность и является альтернативой многочастотному радиолокационному комплексу, состоящему из набора узкополосных радиоимпульсных локаторов с различными несущими частотами. Это позволяет существенно улучшить информационные возможности радиолокационного зондирования, в том числе и для систем космического базирования двойного назначения.

Одним из ключевых элементов видеоимпульсного радиолокатора является антенное устройство, обеспечивающее излучение и прием СКВИ. Анализ показал, что для реализации потенциальных возможностей такой аппаратуры антенное устройство видеолокатора должно представлять собой многоэлементную антенную видеоимпульсную сканирующую решетку. Она позволит обеспечить большой уровень излучаемой мощности путем сложения в пространстве СКВИ от многих генераторов видеоимпульсов (ГВИ), подключаемых к излучателям решетки. Перспективной является совмещенная видеоимпульсная решетка, работающая в режимах излучения и приема, аналогичная классической АФАР.

Сверхширокая полоса СКВИ заставляет отказаться от традиционного для радиоимпульсных ФАР и АФАР управления сканированием с помощью фазовращателей, устанавливаемых в приемопередающих модулях, а требует замены их на управляемые линии задержки.

**Излучатели сверхкоротких видеоимпульсных сигналов.** При выборе типа излучателей принимались в расчёт следующие соображения:

- максимальная эффективность излучения;
- минимальная масса и технологичность изготовления;
- наличие научно-методической и алгоритмической базы проектирования излучателей данного типа, пригодной для инженерных разработок.

Рассмотрим кратко основные типы антенн, которые могут быть применены для создания сканирующей видеорешетки: ТЕМ-рупоры и их модификации, зеркальные импульсные антенны, пазовые антенны.



**Рис. 12.6.** Общий вид ТЕМ-рупора

**ТЕМ-рупоры.** Для работы со сверхкороткими импульсными видеосигналами пригодна специально разработанная конструкция ТЕМ-рупора (рис. 12.6) или его модификации в виде диполя V-формы. Экспериментально подтверждено, что излучатель указанной конструкции имеет полосу частот от 200 МГц до 1,6 ГГц по критерию коэффициента отражения на входе менее 0,1. Эффективная апертура диполя в указанной полосе сохраняется на уровне 0,04 м<sup>2</sup> при физическом размере 0,11 м. Это соответствует коэффициенту использования поверхности 0,36.

Полоса частот ТЕМ-рупора практически соответствует требованиям их применения в антеннах для ВИРСА. Для его расчета имеется методическая база инже-

нерного проектирования, но в отношении технологичности конструкции он уступает рассмотренному далее пазовому излучателю Вивальди.

Метод синтеза широкополосного проволочного вибратора с распределенной резистивной нагрузкой путем вариации его формы приведен в [495]. Этот вибратор (типа «ножницы») похож на простой V-диполь, но отличается от него криволинейной формой плеч, изогнутых внутрь. Выбором формы плеч вибратора и закона изменения резистивной нагрузки можно максимизировать ширину полосы частот.

Вариант V-диполя с резистивной нагрузкой на концах проводов, представлявшей собой линейно нарастающее сопротивление от  $2/3$  до 40 Ом на участках от  $0,8L_w$  до  $L_w$  длины проводов вибратора, имеет КУ 5,7 дБ и вариацию КСВН менее  $\pm 1,25$  дБ на уровне 1,7 в полосе  $\Delta f \in (1 \dots 18)$  ГГц. Теоретические результаты подтверждены экспериментально на масштабной модели. Измерения КСВН проведены с характеристическим импедансом линии возбуждения 330 Ом.

Такой тип СШП-антенны имеет необходимую величину перекрытия частот рабочего диапазона и при соответствующих габаритах может удовлетворить приведенным выше для видеоимпульсных антенных решеток требованиям, но наличие в его конструкции поглощающих элементов уменьшает эффективность излучения.

**Зеркальные антенны.** Специально для работы с СКВИ-сигналами и потому названные импульсными зеркальными антеннами предложены в [349]. Эти антенны состоят из возбуждителя поперечной электромагнитной волны (ТЕМ-возбудитель), присоединенного через нагрузку к краям зеркала. ТЕМ-возбудитель подобен описанному выше V-диполю, плечами которого являются проводники конической формы, возбуждаемые в вершинах конусов. Нагрузка в местах соединения ТЕМ-возбудителя с зеркалом выбирается так, чтобы обеспечить режим бегущей волны для генератора.

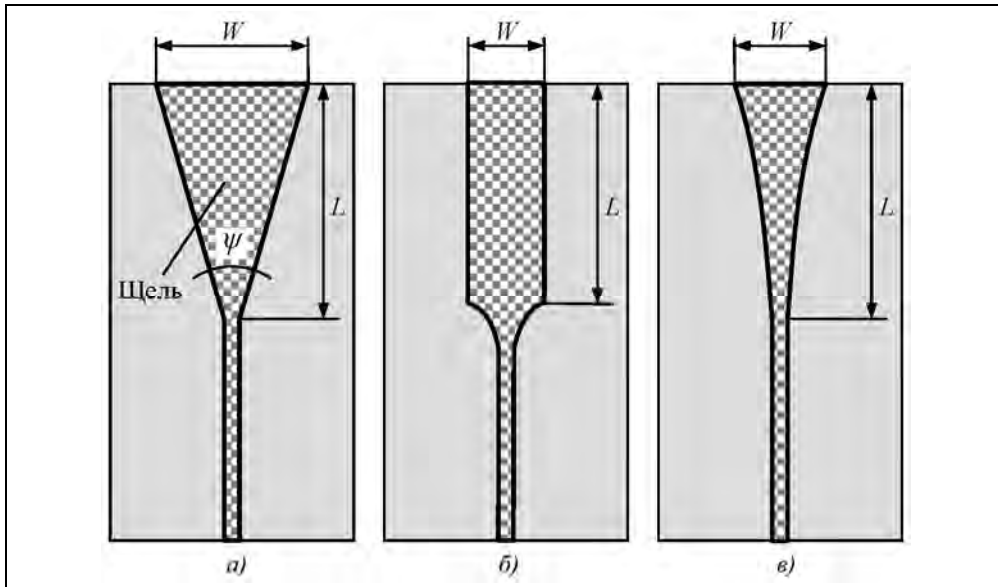
В зеркальных антеннах достигнута величина перекрытия частот  $q = f_H / f_L = 80$ , что даже превышает предъявляемые к ним требования, но по критериям сложности конструкции и отсутствию методики проектирования эти антенны уступают пазовым излучателям Вивальди.

**Пазовые антенны.** Пазовые антенны (ПА) относятся к классу антенн бегущей волны и в печатном исполнении представляют собой расширяющуюся щель той или иной формы в тонком листе проводника на подложке из диэлектрика или без него при конечной толщине металла. Возбуждение излучателя осуществляется в узкой части щели. Для сокращения продольной длины антенны ее узкая часть может заканчиваться плоским резонатором, обычно круглой формы.

Исследованы ПА с различной формой щели – линейно расширяющейся, расширяющейся экспоненциально или комбинированной (рис. 12.7). Антенны этого типа проанализированы как приближенно путем замены непрерывно изменяющейся ширины щели совокупностью ступенчатых отрезков постоянной ширины [356], так и строгими методами [355].

Экспериментально установлено, что минимальную ширину ДН имеет антенна с постоянной шириной щели, а максимальную – с экспоненциальной щелью, однако этот эффект заметным образом проявляется при длине антенны  $L$  в несколько длин волн. Основное ограничение накладывается на максимальную ширину щели

$W$ , определяющую нижнюю граничную частоту  $f_L$ . Эти величины связаны приближенным соотношением  $f_L$  (ГГц) =  $18/H$  (см) в свободном пространстве.



**Рис. 12.7.** Вид различных вариантов пазовых антенн

Особенностью антенн этого типа является продольный характер излучения – вдоль оси симметрии щели, в сторону ее расширения. В антенне распространяется бегущая волна типа поверхностной с фазовой скоростью  $V_\phi$ , меньшей скорости света в вакууме. При протяженности щели несколько длин волн в воздухе пазовая антенна может формировать ДН с шириной около  $15^\circ$  по уровню минус 3 дБ и коэффициентом усиления до 17 дБ. Укорочением длины антенны можно расширить её ДН, но при этом согласование антенны несколько усложняется.

Плоская конструкция излучающего элемента позволяет удобным образом интегрировать его с цепями возбуждения на одной подложке и допускает близкое расположение подобных элементов в антенных решетках, позволяя уменьшить уровень боковых лепестков. Кроме того, несмотря на плоскую геометрию, пазовые антенны могут в принципе обеспечивать ДН равной ширины как в  $E$ - (параллельной плоскости щели), так и в  $H$ -плоскости.

Ширина полосы рабочих частот пазовых антенн может превышать 2–3 октавы.

Входной импеданс  $Z_{\text{ant}}$  антенн на тонких подложках наиболее обстоятельно исследован теоретически и экспериментально для антенн с линейно расширяющейся щелью. Для углов раствора щели ( $5\dots 15^\circ$ ) он равен около 80 Ом, слабо изменяясь в рабочей полосе частот. При длине антенны более четырех длин волн величина  $Z_{\text{ant}}$  слабо зависит и от формы щели, что является еще одним достоинством пазовых антенн. Приведенная величина  $Z_{\text{ant}}$  позволяет сравнительно просто согласовать ПА с 50-омными фидерными трактами в следующей конструкции – две ан-

тенны располагаются параллельно диэлектрическими подложками внутрь и возбуждаются полосковой линией с согласующим короткозамкнутым или разомкнутым шлейфом, размещаемыми между подложками поперек узкой части щели.

Для уменьшения продольного размера пазовой антенны короткозамкнутую часть щели заменяют резонатором обычно круговой формы по одну сторону от точки возбуждения. Реактивный импеданс такого резонатора при определенном выборе его размера в значительной мере компенсирует реактивный входной импеданс антенны. Экспериментально было установлено, что периметр резонатора, при котором наблюдается наилучшее согласование антенны с фидерным трактом, очень близок к длине излучающей части щели. При этом условии импульс напряжения, отражающийся от короткозамкнутой части резонатора и изменяющий свою полярность на противоположную, компенсируется в точке питания отраженным от разомкнутой части щели импульсом, не изменяющим своей полярности.

Антенны данного типа представляются наиболее приемлемыми в качестве антенных элементов бортовых антенных устройств для ВИРСА по причине как технологичности их конструкции, отсутствию в их составе поглощающих элементов, так и наличию методов их расчета. Именно такие излучатели были наиболее обстоятельно исследованы теоретически и экспериментально, а также проверены в составе макета видеоимпульсной сканирующей антенной решетки.

**Передающий канал видеоимпульсной сканирующей антенной решетки.** Кратко рассмотрим построение передающего и приемного каналов видеоимпульсной сканирующей антенной решетки с аналоговым управлением задержкой видеоимпульсов. На рис. 12.8 представлена структурная схема передающей видеоимпульсной антенны. Сигнал генератора импульсов запуска (ГИЗ) с помощью разветвителя сигнала запуска (Р) делится по числу  $n$  излучателей (каналов) антенной решетки. В каждом канале решетки импульс запуска задерживается на требуемую величину с помощью управляемого устройства дискретных задержек (УДЗ). Задержанные сигналы подаются на входы генераторов видеоимпульсов (ГВИ), выходы которых подключены к антенным излучателям.

Установка требуемых величин задержек в каналах решетки в зависимости от заданного направления луча и выдача их устройствам дискретных задержек производится программируемым устройством управления ПУУ.

Генератор импульсов запуска, разветвитель, устройства дискретных задержек и программируемое устройство управления составляют основные элементы системы управления лучом СУЛ передающей видеоимпульсной сканирующей антенной решетки.

Передающие видеоимпульсные антенны, как и АФАР, в зависимости от назначения могут иметь от десяти до нескольких тысяч каналов. Требуемый сектор обзора может быть двумерным и достигать в одном измерении более  $100^\circ$ . Если требуется иметь узкую диаграмму направленности в широком двумерном секторе обзора, то число требуемых дискретных положений ДН в этом секторе может составлять несколько десятков тысяч.

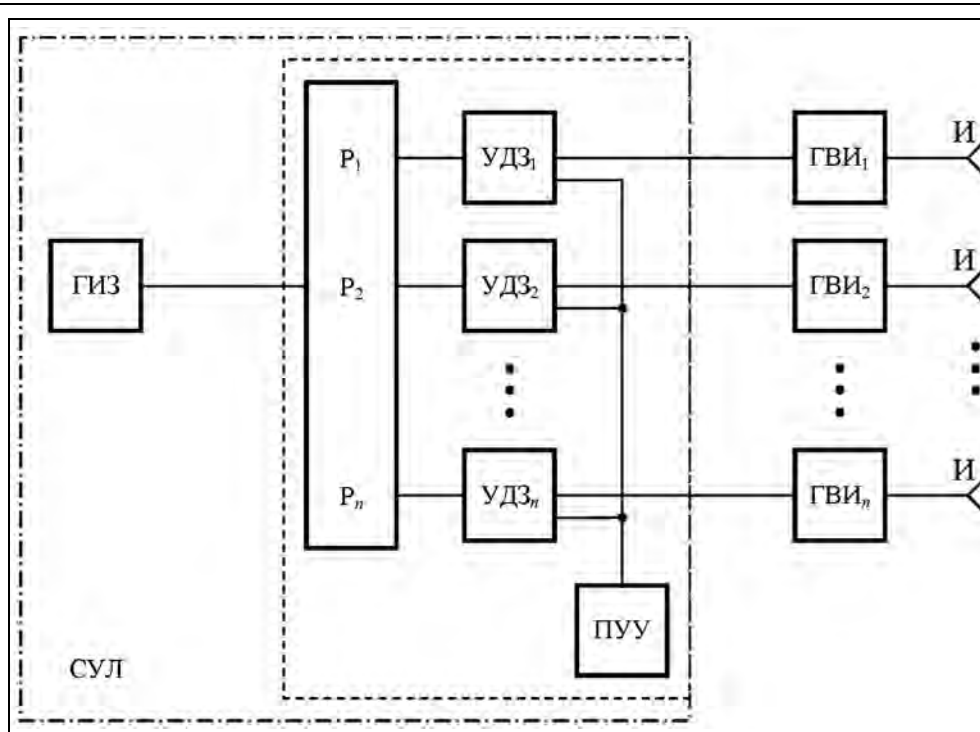


Рис. 12.8. Структурная схема передающей активной видеорешетки:

ГИЗ – генератор импульсов запуска; P – разветвитель  $1 \times n$ ; УДЗ – устройство дискретных задержек; ПУУ – программируемое устройство управления; ГВИ – генератор видеоимпульсов; И – излучатель; СУЛ – система управления лучом

**Приёмный канал видеоимпульсной сканирующей антенной решетки.**

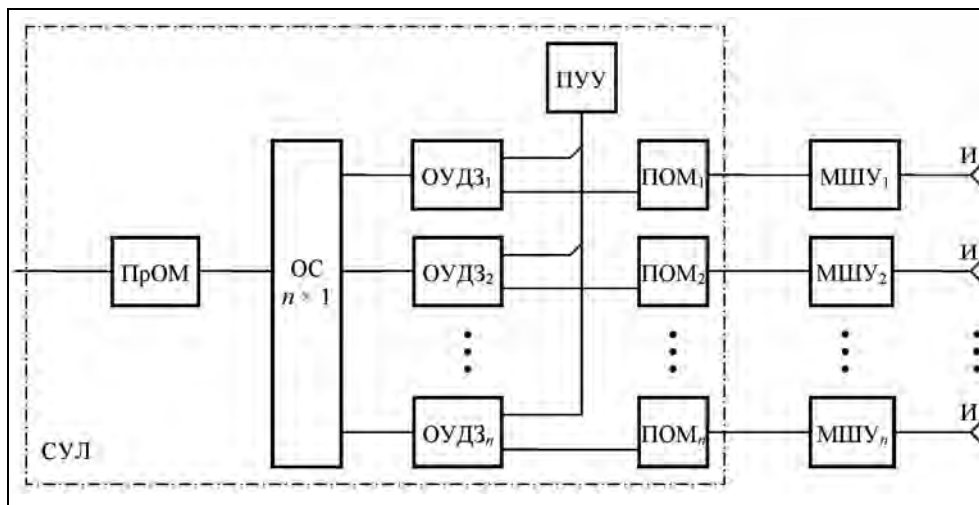
Принципиально в видеоимпульсной антенне можно использовать аналоговые электронные, оптоэлектронные, а также цифровые устройства задержки с синхронным суммированием сигналов для управления направлением приема отраженных сигналов. Рассмотрим оптоэлектронный вариант как наиболее перспективный для реализации. Структурная схема такой антенны приведена на рис. 12.9. Сигналы, принимаемые излучателями каналов решетки, усиливаются малошумящими усилителями (МШУ). Сигнал на выходе МШУ в каждом канале решетки преобразуется из радиодиапазона длин волн в оптический диапазон сверхширокополосными передающими оптическими модулями (ПОМ). Задержки создаются в результате распространения светового потока, модулированного радиосигналом, через оптическую линию устройства дискретных задержек (ОУДЗ). Далее оптические сигналы суммируются с заданными временными задержками (модуль ОС) и преобразуются из оптического в радиодиапазон сверхширокополосным приемным оптическим модулем (ПрОМ).

Для исключения потерь в элементах СУЛ (ПОМ и ПрОМ) желательно в этих элементах производить усиление сигнала на 10...20 дБ в каждом канале. Шумовые

характеристики элементов СУЛ (в частности, ПОМ и ПрОМ) не должны ухудшать чувствительность приемной антенны в целом.

Примером оптоэлектронного устройства дискретных задержек (ОУДЗ) может служить программируемое интегрально-оптическое устройство задержек, разработанное, в частности, и для применения в составе антенных решеток. Оно является 8-разрядным и, следовательно, возможное количество значений задержки равно 256. В каждом из разрядов оптический модулированный сигнал направляется бинарным переключателем по одному из двух интегрально-оптических фидеров. Длины фидеров выполняются различными, так что на выходе разряда образуется одна из заданных временных задержек. Дискрет задержки может составлять от 1 до 8,8 пс, что соответствует максимальному значению задержки 2245 пс. Оптические потери на рабочей длине волны 1,55 мкм не превосходят 10 дБ. Напряжение питания составляет 5 В, мощность потребления не превышает 2 Вт. Рабочая температура от минус 40 до 85 °С. Габариты не превосходят 10 см<sup>3</sup>, масса составляет не более 0,1 кг.

На основе существующих элементов может быть создана СУЛ приемного канала видеоимпульсной антенны с шириной полосы сигнала до нескольких ГГц, количеством каналов до нескольких десятков, числом независимых лучей в секторе обзора до тысячи. При этом должна обеспечиваться точность задания задержек до нескольких десятков пикосекунд в диапазоне до нескольких десятков наносекунд при времени переключения лучей около 1 мс.



**Рис. 12.9.** Структурная схема приемного канала видеоимпульсной антенны с оптоэлектронным управлением лучом

Для эффективной работы СУЛ с большим числом каналов, разнесенных по апертуре больших размеров, должен быть устранен разброс значений задержек сигналов в каналах антенны до их суммирования. Кроме того, при эксплуатации антенны задержки сигналов в активных и пассивных элементах могут меняться из-за температурных, механических и других факторов. Разброс задержек может ком-



пенсироваться как дополнительными электронными или оптическими настроечными устройствами, так и основными УДЗ СУЛ. В последнем случае в УДЗ, кроме разрядов, обеспечивающих сканирование луча, могут потребоваться дополнительные разряды для настройки и стабилизации задержек при эксплуатации; СУЛ может дополнительно содержать устройства измерения задержек в каналах.

### **12.2.7. Перспективы развития антенных систем для РСА космического базирования**

Анализируя тенденции развития систем радиолокационного землеобзора космического базирования, можно сделать вывод о приоритетных направлениях в совершенствовании антенной техники. Антенны РСА должны обеспечивать поляриметрическое зондирование с широкими углами электронного сканирования для повышения оперативности наблюдения. Должны рассматриваться конструктивные решения, пригодные для размещения на малых космических аппаратах и «микроспутниках», а также в многочастотных радиолокационных комплексах, использующих зондирование как в коротковолновой части СВЧ-диапазона волн ( $X$  и  $C$ ), так и в дециметровых диапазонах волн ( $S$ ,  $L$  и  $P$ ).

Совершенствование антенной техники базируется на рассмотренных в гл. 13 технических решениях, реализованных в действующей аппаратуре и проектных проработках.

*Основными перспективными направлениями в развитии антенных устройств для РСА следует считать:*

- создание и совершенствование поляриметрических многосекционных активных фазированных антенных решеток с цифровым выходом сигнала, одночастотных и совмещенных многочастотных;
- создание и совершенствование легких, компактных в размещении на КА гибридных зеркальных антенн с излучателями типа АФАР для работы в составе малых космических аппаратов. Так же, как и для АФАР, должны предусматриваться поляриметрическое зондирование, многочастотность, цифровой выход сигнала;
- совершенствование комплектующих элементов АФАР – приемопередающих модулей, источников питания, процессоров управления, СВЧ распределительных систем, в том числе и с применением оптоэлектронных устройств;
- разработку видеоимпульсных антенных решеток для видеоимпульсных РСА космического базирования.

*В качестве прототипов по многочастотным АФАР могут рассматриваться:*

- технические решения, реализованные в трехчастотном бортовом комплексе SIR-C/X-SAR многоразового космического корабля Space Shuttle, в котором на раме размером  $10 \times 3 \text{ м}^2$  размещены независимо три антенны – АФАР  $C$ - и  $L$ -диапазонов волн и щелевая антенна  $X$ -диапазона волн [521]. Такое конструктивное решение облегчает отработку антенны, ее модификацию, замену вышедших из строя элементов при подготовке аппаратуры к очередному запуску на орбиту. Уникальный вариант модификации антенной системы с ус-

тановкой приемных антенн X- и C-диапазонов на выдвижной 60-метровой штанге для проведения топографической съемки – программа SRTM [521], по-видимому, сложен в повторении и может быть успешно заменен тандемом спутников на близких орбитах [276, 317];

- проектные проработки АФАР X-диапазона волн (см. подраздел 12.2.2), а также совмещенной антенны дециметровых L- и P-диапазонов волн для БРЛК «Спинар-1ДМ» космического аппарата «Аркон-2» (см. подраздел 12.2.3).

Технический задел по гибридным зеркальным антеннам базируется на ГЗА с электронно-управляемой решеткой облучателей РСА для малого КА «Кондор-Э», а также на проработках АФАР-ГЗА для низкоорбитальных и высокоорбитальных РСА [103, 173\*].

### **12.3. Генераторы частот и сигналов для космических РСА**

К генераторам опорных частот и сигналов, используемым в космических РСА, предъявляются жесткие требования по стабильностям частот, что обеспечивает повторяемость материалов радиолокационной съемки для их интерферометрической обработки. Для получения высокой разрешающей способности по дальности в доли метра требуются сигналы с шириной спектра излучения до 200...500 МГц. Требуемый энергетический потенциал достигается применением широкополосных сигналов с длительностью порядка 20...40 мкс, которая зависит от выбранного периода повторения зондирующих импульсов (200...700 мкс в зависимости от горизонтального размера антенны) и допустимой для выходных импульсных транзисторов скважности работы (обычно  $\geq 10$ ). Как уже отмечалось, в космических РСА используют зондирующие сигналы преимущественно с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Для исключения появления в импульсном отклике РСА ложных боковых лепестков при коэффициенте сжатия сигналов по времени  $\sim 10000$  необходимо, чтобы фазовые искажения в законе ЛЧМ-модуляции не превышали единиц градусов и обеспечивался низкий уровень шумов в паузе между импульсами [243\*, 244\*, 305, 440\*].

Экономное расходование электроэнергии солнечных батарей и емкости буферного аккумулятора требует изменения мощности излучения при съемке на больших и малых дальностях в пределах полосы обзора. Это достигается изменением скважности излучения путем изменения длительности зондирующего импульса. Полоса сигнала при этом не меняется, что требует формирования импульса с другой крутизной изменения ЛЧМ.

Предусматривается широкая номенклатура генерируемых сигналов, нужных не только для разных режимов съемки, но и для применения методов подавления помех неоднозначности сигналов, рассмотренных в гл. 8. Так, например, формируются зондирующие сигналы с манипуляцией начальной фазы  $[0, \pm\pi]$  по псевдослучайной последовательности с возрастающим и ниспадающим законами изменения ЛЧМ.

Изменение частот и параметров сигналов (длительность импульса, закон ЛЧМ, фаза излучения, частота повторения и др.) достигается путем цифрового управления синтезатором частот и сигналов по программе или по уточненным баллистическим данным, получаемым от бортового компьютера КА.

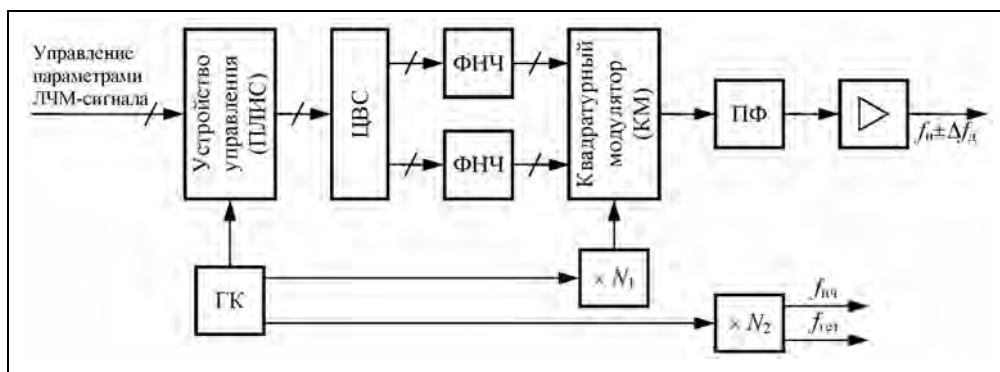
В [243\*] описан синтезатор частот и широкополосных ЛЧМ-сигналов  $S$ -диапазона, входящий в состав РЛС с синтезированной апертурой для обзора земной поверхности. Синтезатор построен на основе быстродействующих микросхем ПЗУ, ПЛИС, ЦАП импортного производства и умножителей частоты. Разрабатываются и отечественные микросхемы – цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС), квадратурные модуляторы (КМ) и схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с аналогичными параметрами.

В связи с появлением новых микросхем ЦВС со встроенными в них 10...14-разрядными цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП), квадратурными модуляторами,  $S$ -диапазона волн [121\*, 122\*], а также малогабаритными керамическими полосовыми фильтрами (ПФ) СВЧ-диапазона [524] возникают и новые возможности разработки синтезаторов частот и широкополосных сигналов с улучшенными электрическими и массогабаритными характеристиками. Имеются данные о выпуске ЦВС с тактовой частотой до 2 ГГц [122\*].

Используя эту элементную базу, можно относительно просто синтезировать квадратурные сигналы на видеочастотах в полосах 0...120 МГц (AD9854), 0...160 МГц (AD9952 при использовании предусмотренной в ней возможности синхронной работы двух таких микросхем) и до 400 МГц (AD9858 без квадратур). Наиболее простым способом получения широкополосных ЛЧМ-сигналов с девиацией частоты до  $\pm 160$  МГц без ее умножения является их квадратурный синтез на видеочастоте и последующий перенос на несущую частоту.

На рис. 12.10 приведена структурная *схема синтезатора частот и широкополосных ЛЧМ-сигналов  $S$ -диапазона волн* [244\*] на основе ЦВС типа AD9854, КМ типа STQ-3016 и ПЛИС типа EPF10K30E, который обеспечивает:

- синтез малозумящих, спектрально чистых, гетеродинных СВЧ и промежуточной частоты непрерывных колебаний для приемного устройства РЛС;
- синтез ЛЧМ-сигналов для передающего устройства с возможностью управления девиацией частоты (до  $\pm 100$  МГц), начальной фазой, знаком скорости изменения частоты в ЛЧМ-импульсе и его длительностью.



**Рис. 12.10.** Структурная схема синтезатора частот и широкополосных ЛЧМ-сигналов  $S$ -диапазона волн [244\*]:

ГК – генератор кварцевый; ЦВС – цифровой вычислительный синтезатор;  
ФНЧ – фильтр нижних частот; ПФ – полосовой фильтр

## Глава 12. Совершенствование аппаратуры радиолокационных комплексов ...

Отметим, что характеристики полосового фильтра оказывают существенное влияние на формируемые ЛЧМ-сигналы. Испытания синтезатора показали, что отклонения от линейности ФЧХ керамического СВЧ-фильтра не превышают  $\pm 5^\circ$  в полосе его пропускания (более 200 МГц). Также мала связанная с этим параметром зависимость группового времени запаздывания от частоты в той же полосе.

При проектировании синтезатора необходимо учитывать достижимые уровни подавления несущего колебания и боковых полос в квадратурном модуляторе. В работе [452] приведено выражение, позволяющее оценить допустимые отклонения от квадратур ( $\psi$ ) и разбаланс амплитуд ( $G$ ) на входах КМ при заданном подавлении боковых полос (SBS – sideband suppression) в децибелах:

$$\psi = \frac{(1 + G^2)(1 - 10^{\text{SBS}/10})}{2 \cdot G(1 + 10^{\text{SBS}/10})}. \quad (12.1)$$

Рассчитанные в соответствии с (12.1) зависимости показывают, что, например, для SBS = -50 дБ разбаланс амплитуд и фаз в полосе сигнала и в условиях эксплуатации не должен превышать 0,04 дБ и 0,25 соответственно. Это приводит к необходимости обеспечения:

- 1) максимальной идентичности электрических и конструктивных характеристик ФНЧ, включенных на выходе ЦВС;
- 2) возможности балансировки схем перемножителей в КМ;
- 3) возможности управления амплитудой и фазовым сдвигом квадратурных колебаний на выходе ЦВС;
- 4) термостабилизации КМ при работе ЦВС в широком интервале температур.

На рис. 12.11 и 12.12 приведены измеренные характеристики сформированного синтезатором частот широкополосного ЛЧМ-сигнала и гетеродинных СВЧ-колебаний. В качестве средств измерений использовались анализатор спектра типа

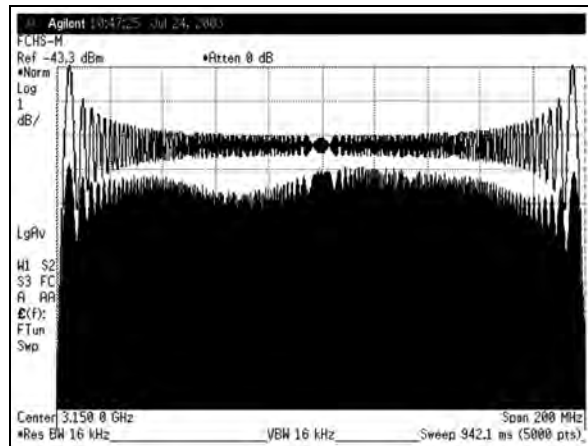


Рис. 12.11. Форма спектра ЛЧМ-радиоимпульса (ширина спектра 200 МГц; масштаб по оси ординат 1 дБ в клетке графика; теоретический спектр для наглядности приподнят над экспериментальным)

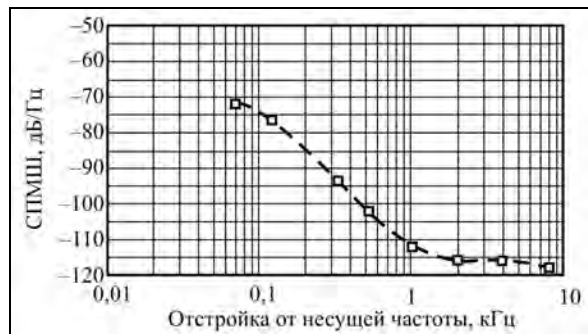


Рис. 12.12. Спектральная плотность мощности шума (СПМШ) колебаний СВЧ-гетеродина

E4440A, измеритель параметров цепей типа E8362B фирмы Agilent Technologies и измеритель фазовых флуктуаций ИФ-5901СА. На рис. 12.11 показан спектр радиоимпульсного сигнала при длительности импульса 5 мкс, периоде повторения 100 мкс с несущей частотой  $f_0 = 3150$  МГц и полосой 200 МГц. Неравномерность амплитуды сигнала не превышает 1 дБ.

На рис. 12.12 показана спектральная плотность мощности шума (СПМШ) колебаний СВЧ-гетеродина, уровень которого не превышает минус 70 дБ относительно максимума со снижением до минус 115 дБ при расстройке на 2 кГц. Требования, предъявляемые к характеристикам зондирующих сигналов, удовлетворяются.

#### **12.4. Характеристики транзисторных усилителей мощности, работающих в импульсном режиме**

В последние годы значительно возрос интерес к разработке импульсных транзисторных усилителей мощности (импульсных ТУМ), предназначенных для работы в усилительных трактах передающих устройств (ПРДУ) импульсных когерентных РЛС. Разработка полностью твердотельных передатчиков РЛС стала возможной благодаря серийному выпуску мощных СВЧ-транзисторов, работающих в импульсном режиме. Дальнейшее развитие этой техники привело к созданию транзисторов, имеющих в  $P$ -диапазоне волн импульсную мощность отдельного транзистора порядка 500...1000 Вт и более: в  $L$ -диапазоне – 300...370 Вт, в  $S$ -диапазоне – более 100 Вт. Это позволило создавать импульсные ТУМ с разумным числом транзисторов в выходном каскаде [123\*], а в случае РСА с АФАР – разрабатывать приемопередающие модули для запитки элементов антенны с минимальными массой и габаритами.

Достигнут значительный прогресс в разработке устройств сложения-деления мощности (СДМ), в частности, увеличено число каналов этих устройств и снижены потери. Это стало возможным как благодаря совершенствованию классических СДМ бинарного типа (удалось расширить диапазон компенсации отраженных волн на выходах делителя), так и в связи с созданием новых типов СДМ, среди которых отметим, прежде всего, радиальные СДМ [286, 448, 457]. В таких устройствах при числе каналов 16–110 потери не превышают 0,2...0,23 дБ в  $L$ - и  $S$ -диапазонах, что невозможно получить ни на каких других типах сумматоров. Хорошим примером одной из последних разработок радиальных сумматоров являются устройства, характеристики которых приведены в [309]. Радиальный сумматор диапазона 1,2...1,4 ГГц, используемый в локаторе системы контроля за дорожным движением, имеет 32 входа и рассчитан на выходную мощность 50 кВт, потери не превышают 0,15 дБ. 16-канальный сумматор в диапазоне волн 44 ГГц имеет выходную мощность 25 Вт и потери 0,5 дБ.

Совершенствуются конструкторские решения и технологии изготовления импульсных ТУМ. Сочетание тонкопленочной и толстопленочной технологий микрополосковых линий на керамических материалах с узлами на органических диэлектриках привело к уменьшению массы и габаритов импульсных ТУМ и повысило их надежность [457].

## Глава 12. Совершенствование аппаратуры радиолокационных комплексов ...

В качестве примера передающего устройства со сложением мощностей рассмотрим разработанное в ОАО «Концерн «Вега» полупроводниковое передающее устройство  $S$ -диапазона для установки на малом космическом аппарате в составе радиолокационной станции [123\*, 440\*].

Выходная импульсная мощность более 3 кВт при средней мощности 200 Вт получена путем сложения мощности 16 усилительных модулей. Основной задачей при проектировании ПРДУ было достижение указанной мощности в полосе сигнала, составляющей 7 % от несущей частоты, при высоких КПД и надежности и приемлемых массогабаритных параметрах. В состав ПРДУ входят формирователь частот и сигналов (ФЧС), предварительный усилитель мощности (ПУМ) и выходной каскад (ВК) с источниками их питания.

Усиление зондирующего сигнала от ФЧС обеспечивает ПУМ, в котором для повышения надежности применяется резервирование, и выходной каскад, выполненный на основе схемы сложения мощностей 16 усилительных модулей. Усилительный модуль обеспечивает импульсную мощность более 300 Вт при средней мощности более 15 Вт.

Структурная схема усилительного модуля показана на рис. 12.13. В выходном каскаде модуля в качестве активных элементов используются транзисторы РН3135-65М фирмы М/А-СОМ, выходная мощность которых в реальной схеме превышает 80 Вт при КПД более 40 %.

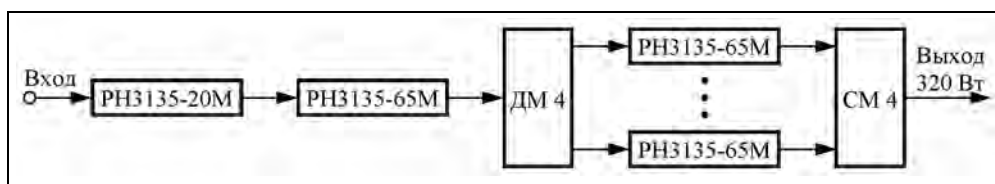


Рис. 12.13. Структурная схема усилительного модуля:  
ДМ – делитель мощности; СМ – сумматор мощности

В выходном каскаде усилительного модуля складывается мощность четырех усилителей на транзисторах РН3135-65М. При разработке усилительного модуля с целью получения КПД более 28 % сумматор мощности СМ-4 был выполнен на диэлектрике с малыми потерями типа ФАФ-4Д. Потери при суммировании не превышают 0,3 дБ. В качестве мощных развязывающих устройств применен специально разработанный вентиль с активными потерями менее 0,5 дБ.

Для ВК построены 16-канальный сумматор и делитель мощности (СМ-16 и ДМ-16) на основе синфазных четвертьволновых мостов, в которых были использованы симметричные полосковые линии с воздушным заполнением, что позволяет получить достаточно малые омические потери – менее 0,2 дБ. Поскольку выходная мощность модулей достаточно велика, развязывающие резисторы в сумматорах не используются, а балластные нагрузки вентилях рассчитаны с учетом перераспределения мощностей в сумматоре при отказах (отключениях) суммируемых модулей ВК.

Общий КПД ПРДУ обеспечивается КПД усилительных модулей, сумматора мощности и источника питания ВК. Заданная надежность ВК получена благодаря

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

использованию избыточного числа модулей, мощность которых складывается. С той же целью источники питания ВК выполнены на основе 16 модулей питания, каждый из которых питает свой усилительный модуль. В них применены модули производства компании «Электронинвест» с реальным КПД 82...88 % при токе нагрузки до 2,8 А и выходном напряжении 36 В.

Приборы ФЧС, ПУМ и модули ВК передающего устройства установлены на панелях с отводом тепла через боковые поверхности. Выходной тракт выполнен на волноводе сечением 72×10 мм. Для защиты ПРДУ от рассогласования в антенном тракте используется волноводный циркулятор, установленный непосредственно перед антенной (в состав ПРДУ не входит).

Полученные в процессе испытаний огибающие и спектры выходного радиоимпульса ПРДУ при различных девиациях приведены на рис. 12.14–12.16.

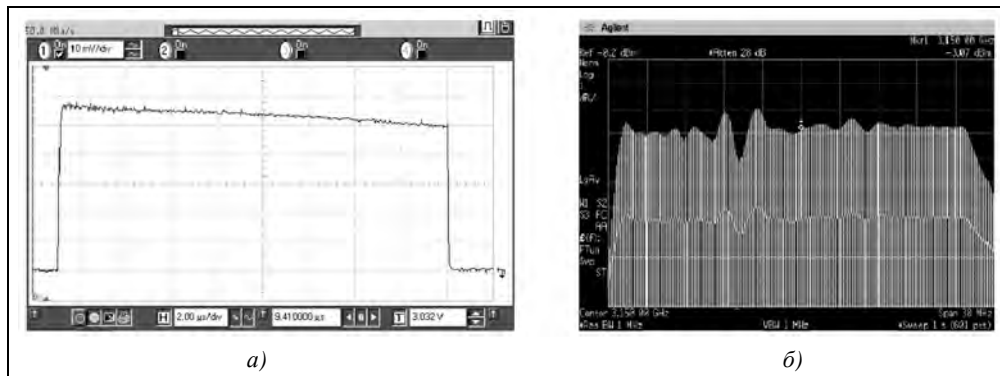


Рис. 12.14. Огибающая (а) и спектр (б) выходного радиоимпульса ПРДУ при девиации 30 МГц

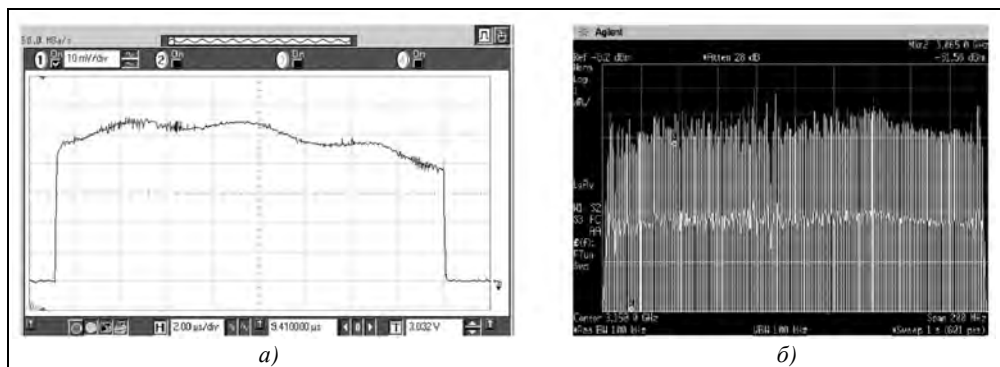


Рис. 12.15. Огибающая (а) и спектр (б) выходного радиоимпульса ПРДУ при девиации 200 МГц

Измеренная зависимость фазы, вносимой трактом усиления ПРДУ в гармонический сигнал (наклонная прямая линия) на центральной частоте 3150 МГц, показана на рис. 12.16, а. На рис. 12.16, б показан гармонический состав сигнала на вы-

ходе ПРДУ. Отметим, что гармоники спектра на выходе прибора ФЧС на дальних отстройках практически подавляются на выходе ПРДУ (кроме второй гармоники). Вторая гармоника сигнала на выходе ПРДУ находится на уровне минус 55,6 дБ, а после циркулятора уровень второй гармоники снижается до минус 61 дБ.

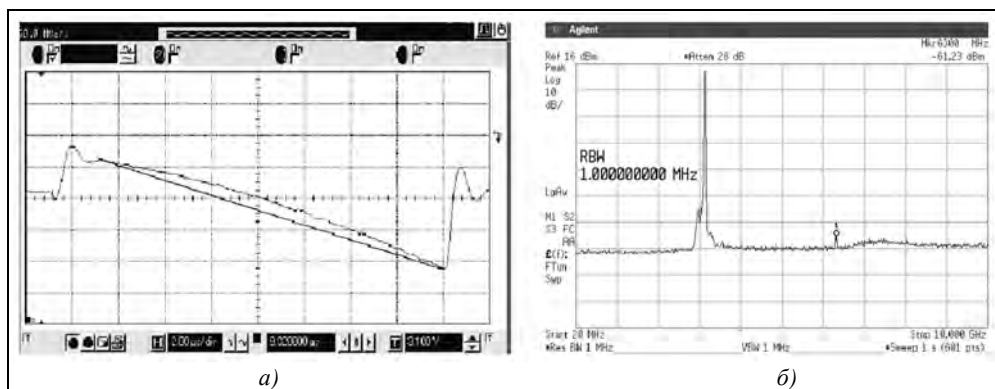


Рис. 12.16. Фазовая ошибка (а) тракта усиления ПРДУ на частоте 3150 МГц и гармонический состав выходного сигнала (б) после циркулятора

Измеренное значение начальных токов транзисторов РН3135-65М составило в среднем не более 4 мкА, что обеспечило без специальных схем подавления шумов ПРДУ в паузе между импульсами значение спектральной плотности шумов в рабочей полосе частот ниже минус 200 дБ/Вт-Гц. Выходная средняя мощность 200 Вт гарантируется при отказах трех из шестнадцати модулей ВК, регулировка средней мощности осуществляется изменением скважности сигнала.

**Фазовременные характеристики усилительных трактов.** Основной особенностью работы транзистора в режиме усиления радиоимпульсов является существенное изменение температуры кристалла транзистора от начала к концу импульса. Типичные величины постоянной времени разогрева кристалла транзистора с выходной мощностью десятки-сотни ватт составляют десятки-сотни микросекунд. Как показано в [496], переходные тепловые эффекты в полевом транзисторе при работе в линейном режиме в системах связи с частотами модуляции 0,1...1,0 МГц приводят к заметным амплитудным искажениям выходного сигнала, фазовые искажения при этом могут быть незначительными.

Рассмотренная в [122\*] задача, решаемая при разработке усилителей импульсного СВЧ-сигнала, в отличие от задачи линеаризации усилителей [496] состоит в обеспечении минимальных изменений амплитуды выходного сигнала и минимального отклонения временной зависимости фазы от линейной в течение импульса.

Типичная длительность радиоимпульса радиолокатора может составлять 10...1000 мкс при скважности более 10 (в ряде случаев скважность может уменьшаться до 2...3). В этом случае существенное изменение температуры кристалла транзистора приводит к изменению параметров усилителя. Как показали измерения, изменение фазы в течение радиоимпульса пренебрежимо мало (менее 1°). В то



же время изменение амплитуды выходного радиоимпульса превышает 23 % или 1 дБ, что в целом подтверждает выводы [496].

Перевод усилителя в режим насыщения существенно улучшает форму огибающей радиоимпульса, изменение мощности не превышает 10 % или 0,5 дБ. Абсолютное изменение фазы выходного сигнала усилителя составляет почти 25°, а отклонение от линейного закона – более 10° на один каскад, что в большинстве случаев является предельной величиной для усилителей ЛЧМ-сигнала. Очевидно, что в многокаскадном усилителе величина отклонения фазы от линейного закона существенно возрастет.

Хорошим компромиссом в данном случае является использование транзистора в режиме, близком к критическому, с системой автоматической регулировки мощности в течение радиоимпульса. Ее применение снижает неравномерность вершины огибающей с 10 до 4 %. Абсолютное изменение фазы не превышает 4°, что хорошо согласуется с данными о малых искажениях модулированного по амплитуде сигнала в таком усилителе. Отклонение фазы от линейного закона не превышает 1°, что позволяет прогнозировать малые искажения и в многокаскадном усилителе.

Использование автоматической регулировки мощности позволяет просто осуществить стабилизацию выходной мощности каскадов и в линейном режиме при неполном использовании транзистора по мощности. Основным недостатком такого решения может показаться малый КПД усилителя. Действительно, снижение КПД пропорционально коэффициенту использования транзистора по напряжению. В то же время, использование такого режима в предварительных каскадах усилителей оправдано при работе транзистора выходного каскада в режиме насыщения. В этом случае основные искажения сигнала будут сконцентрированы в выходном каскаде, а суммарные искажения будут минимальны.

Искажения сигнала в усилителях радиоимпульсов на биполярных транзисторах подробно исследованы в [309], где показано, что фазовые искажения в ЛЧМ-сигналах в таких усилителях определяются параметрами модуляции. В принципе требуемые фазовые характеристики для каждого закона изменения частоты могут быть получены путем введения предискажений. Однако амплитудные искажения в течение импульса, связанные с разогревом кристалла биполярного транзистора, сконцентрированы в основном в выходном каскаде, так как биполярные транзисторы в усилителях для РЛС используются в основном в режиме, близком к критическому или в насыщении, для получения приемлемых значений КПД. Это не позволяет использовать предискажения при формировании огибающей выходного сигнала усилителя.

Формирование огибающей радиоимпульса следует осуществлять в выходном каскаде усилителя мощности. Уровни мощностей предварительных и входных каскадов такого усилителя необходимо стабилизировать для получения оптимальных энергетических характеристик выходного каскада.

Вместе с тем существенным недостатком регулировки выходной мощности ВУМ с помощью перестраиваемого источника питания является малая скорость такой регулировки. Наличие в цепях питания ВУМ накопителя энергии большой

ёмкости не позволяет с достаточной скоростью изменять напряжение питания ВУМ. В типовом ВУМ  $S$ - или  $L$ -диапазона с длительностью импульса до 100 мкс время перестройки уровня выходной мощности ВУМ на 12 дБ составляет около 150 мс, в то время, как требуемое время перестройки составляет порядка 1...2 мс.

В [134\*] предложен способ построения устройств электропитания ВУМ, свободный от описанного недостатка. Суть этого способа заключается во включении между накопителем энергии и ВУМ быстродействующего импульсного регулятора с обратной связью по напряжению питания ВУМ или с детектора огибающей выходного сигнала ВУМ. Такое решение позволяет сократить время перестройки уровня выходной мощности ВУМ до 0,1...1 мс. Кроме того, предложенное в [134\*] решение позволяет стабилизировать уровень выходной мощности ВУМ или даже формировать огибающую выходного импульса ВУМ требуемой формы, перенося тем самым часть весовой обработки на передающую сторону с сохранением высокого КПД передатчика. Ещё одним преимуществом такого способа построения устройства электропитания ВУМ является в 10...40 раз меньшее значение необходимой ёмкости накопителя энергии, что позволяет в ряде случаев в несколько раз сократить массу передающего тракта ППМ, особенно в РЛС с большой длительностью импульса.

### **12.5. Совершенствование приемопередающих модулей применительно к гибридным зеркальным антеннам с АФАР-облучателями**

Анализ публикаций по приемопередающим модулям антенных устройств (АФАР), применяемых в РСА землеобзора космического базирования [123\*, 133\*, 340, 341, 365, 453, 498], показывает, что основные технические проблемы связаны с повышением мощности выходных каскадов ППМ и с развитием технологии изготовления модулей. В связи с применением в РСА широкополосных сигналов с шириной спектра до 300...500 МГц в приемных каналах модулей используют аналоговые элементы на несущей частоте РСА с суммированием выходных СВЧ-сигналов ППМ в достаточно сложной распределительной системе, входящей в состав АФАР. Задачей перспективных разработок является создание АФАР с цифровым формированием ДНА. Для этого потребуется разработка широкополосных приемных каналов ППМ, в которых предусмотрены цифровой выход сигнала, как это реализуется в более узкополосных системах [37\*].

Как отмечено в подразделе 12.2.1, одно из направлений совершенствования аппаратуры РСА связано с применением гибридных зеркальных антенн с АФАР-облучателями. Это позволяет расширить возможности радиолокационного зондирования путем создания многочастотных РСА, РСА с повышенным энергетическим потенциалом и полосой обзора, высокоорбитальных РСА.

Возможности электронного сканирования луча в ГЗА ограничены фазовыми искажениями при выносе центра облучения из фокуса зеркала. Компенсация этих явлений достигается созданием специального амплитудно-фазового распределения по пятну, облучающему рефлектор антенны [103, 206\*].

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Общим требованием к ППМ для антенных устройств РСА является обеспечение работы РСА в поляриметрическом режиме, при котором выход передающего канала ППМ должен подключаться по команде к излучателям горизонтальной Г или вертикальной В поляризаций радиоволны и должны быть предусмотрены два приемных канала для обеих поляризаций сигнала.

Структурная схема модернизированного ППМ, предназначенного для использования в АФАР-ГЗА, приведена на рис. 12.17.

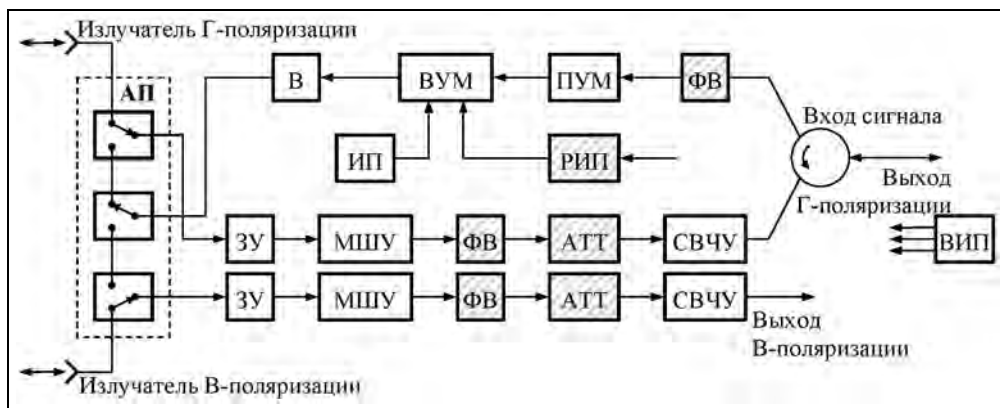


Рис. 12.17. Структурная схема модернизированного ППМ, предназначенного для использования в АФАР-ГЗА (регулируемые устройства показаны штриховкой)

В его состав входят передающий и два приемных канала. В передающий канал входят: входной и выходной вентили В, регулируемый фазовращатель ФВ, предварительный усилитель мощности ПУМ, выходной усилитель мощности ВУМ, импульсный модулятор ИМ, регулируемый источник питания (РИП), антенный переключатель (АП), совмещенный с переключателем поляризаций.

Каждый из приемных каналов горизонтальной и вертикальной поляризаций включает: защитные устройства ЗУ, малошумящие усилители СВЧ МШУ, регулируемые фазовращатели ФВ, регулируемые аттенюаторы АТТ, СВЧ-усилители СВЧУ.

В выходном транзисторном усилителе мощности обеспечивается глубокая регулировка выходящей мощности. Управление системой электропитания с помощью РИП позволяет получить высокий КПД трактов усиления мощности ППМ при значительном (в несколько раз) снижении выходной мощности от максимального значения. При таком снижении выходной мощности ППМ их вклад в электропотребление кластера незначителен и снижение КПД становится допустимым. Базой для создания перспективных РСА, работающих в S-диапазоне волн, является рассмотренный в разделе 12.4 технический задел по передающим устройствам, полученный при разработке РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» [440\*].

Для выполнения требований глубокой регулировки выходной мощности по задаваемой программе во все ППМ следует установить схему автоматической регулировки уровня выходной мощности, решающей следующие задачи:

1) поддержание заданного значения выходной мощности во всех условиях эксплуатации;

2) установку требуемого уровня выходной мощности в зависимости от места расположения ППМ в АФАР и угла сканирования (для использования электронно-механического управления лучом);

3) стабилизацию уровня выходной мощности ППМ в течение импульса.

Особенностью требований к передающему каналу ППМ является большой диапазон регулирования выходных мощностей (до 12 дБ). Снижение мощности транзистора относительно номинальной путем снижения входной мощности, как правило, приводит к ухудшению КПД ВУМ, а в биполярных транзисторах – к искажению формы импульса. В то же время при использовании источника питания с регулируемым выходным напряжением появляется возможность уменьшения выходной мощности путем изменения режима работы транзистора. Исследования усилителей *S*- и *L*-диапазонов показывают, что за счет изменения входной мощности глубина регулировки без существенного изменения КПД и формы огибающей составит порядка 2 дБ. Снижение напряжения питания дает снижение выходной мощности, пропорциональное квадрату изменения напряжения питания. В рассмотренных выше ВУМ со сложением мощностей двух транзисторов (палетт) имеется возможность снижения мощности ВУМ на 6 дБ путем отключения питания одного из транзисторов (палетты). Тогда регулировка мощности за счет изменения напряжения питания составит 9 дБ или 8 раз, требуя снижения напряжения питания примерно в 2,8...3 раза, что реализуемо.

## **12.6. Требования к приемному тракту РСА**

Приемный тракт современных РСА, использующих антенные устройства типа АФАР или АФАР-ГЗА, как правило, включает в себя приемные каналы приемопередаточных модулей, работающие на несущей частоте РСА, и сосредоточенное приемно-усилительное устройство (приемник) супергетеродинного типа, на выходе которого установлены фазовые детекторы, преобразующие сигналы к видеочастоте (квадратурные составляющие). Современная тенденция проектирования аппаратуры РСА предусматривает включение в состав приемника аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для преобразования аналогового видеосигнала в цифровую форму. Разрядность выходных данных (от двух до восьми разрядов, включая знак) задается по команде.

Обычно входные СВЧ-каскады – малошумящие усилители (МШУ) для ППМ и приемника одинаковы. Это позволяет снизить коэффициент усиления приемного тракта ППМ. Шум-фактор МШУ определяется элементной базой и обычно составляет около 2 дБ.

В состав приемника входят МШУ, смеситель, усилитель промежуточной частоты (УПЧ), цифровые управляемые аттенюаторы, позволяющие по командам от вычислительного устройства поддерживать постоянный средний уровень сигнала на входе АЦП. Это позволяет корректировать изменения мощности принимаемого сигнала в зависимости от наклонной дальности съемки и отражающей способности

### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

наблюдаемой местности. Обязательна установка в тракте приемника быстродействующих ограничителей, предотвращающих перегрузку приемника от сильных сигналов. Затухание, вносимое аттенуатором (код установки аттенуаторов), включают в состав служебной информации для его учета при синтезе РЛИ.

Основными требованиями к приемному тракту (приемным каналам ППМ и приемнику) являются обеспечение равномерности амплитудной характеристики в рабочей полосе частот ( $\sim 1$  дБ), линейности и стабильности фазовой характеристики ( $\leq 5^\circ$ ), стабильности усиления, идентичности коэффициентов передачи квадратурных каналов ( $\sim 1 \dots 2$  %). Контроль этих параметров обеспечивается средствами внутренней калибровки, рассмотренными в гл. 11.

Как показывает опыт тестирования аппаратуры РСА и приведенные в литературе результаты многолетней эксплуатации РСА космического базирования, вклад приемного устройства в суммарные нестабильности сквозного тракта РСА меньше, чем у формирователя частот и сигналов, передающего тракта и антенны.

---

## Глава 13

# КОСМИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И НАЗЕМНЫХ (НАДВОДНЫХ) ОБЪЕКТОВ

### 13.1. Этапы создания космической аппаратуры радиолокационного наблюдения

Более чем полувековая деятельность в области создания космических средств радиолокационного наблюдения внесла существенный вклад в развитие общей теории радиолокации, теории фильтрации сигналов, радиофизики, информатики, науки о Земле. Были проведены теоретические исследования, созданы самолетные прототипы-аналоги космической аппаратуры для экспериментальных исследований земных покровов, выполнены проектно-конструкторские проработки вариантов построения аппаратуры, из которых не более 10 % были реализованы в виде действующих космических систем, а остальные создали научно-технический задел для перспективных разработок. Многочисленные экспериментальные материалы, полученные с помощью космической и самолетной аппаратуры, систематизированы и стали основой развития количественных методов интерпретации результатов радиолокационной съемки, включая создание математических моделей рассеяния электромагнитных волн от подстилающей поверхности и подповерхностных образований.

В данной главе приведен ретроспективный обзор аппаратурных решений, заложенных в разработку космических систем РЛН, включая реализованные проекты и научно-технический задел. В развитии космических РСА явно видны этапы с разными возможностями получения и реальным использованием радиолокационной информации. Ими можно охарактеризовать «поколения» создания аппаратуры.

*Первое поколение* (1978–1992) – это однорежимные одноканальные РСА, решавшие задачу исследований методов радиолокационного землеобзора SEASAT, SIR-A, SIR-B, а также РСА «Меч-К» КА «Космос-1870» и «Меч-КУ» КА «Алмаз-1», которые проектировались как средства видовой разведки, но фактически были использованы с целью оценки потенциальных возможностей РСА космического базирования для решения широкого круга задач, включая исследование природных ресурсов, экологический мониторинг океанской поверхности, изучение ледового покрытия, ведение сельского и лесного хозяйства, геологию, картографию, а также задачи Министерства Обороны [215].

Ко *второму поколению* (1992–2000) следует отнести одноканальные РСА, функционирующие в «эксплуатационном» режиме, обеспеченные инфраструкту-

рой обработки и распределения информации для широкого круга потребителей, в том числе и на коммерческой основе. К ним относятся PCA ERS-1, ERS-2, JERS-1, Radarsat-1. По заложенным в эти PCA (кроме Radarsat-1) техническим решениям (одноканальные, однорежимные, с фиксированным положением полосы съемки) они относятся к первому поколению бортовой аппаратуры, но созданная инфраструктура для доставки получаемой с помощью этой аппаратуры информации на Землю, ее обработки и распределения потребителям является серьезным шагом в развитии информационных систем космического базирования. Большой вклад в методологическое обеспечение тематической обработки РЛИ был внесен исследовательским трехчастотным поляриметрическим комплексом SIR-C/X-SAR многоразового космического корабля (КК) Space Shuttle, по результатам орбитальных полетов которого (запуски апрель и сентябрь 1994) были определены количественные характеристики отражения электромагнитных волн от наблюдаемой местности.

К *третьему поколению* космических PCA (2000–2006) следует отнести реализацию миссии SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) – топографическая съемка 80 % земной поверхности с помощью радиолокационного комплекса SIR-C/X-SAR, дополненного интерферометрическими каналами X- и C-диапазонов волн, в которых использовали приемные антенны, удаленные от корпуса КК с помощью 60-метровой выдвижной штанги. Также к третьему поколению будем относить серию PCA военного назначения (видовая всепогодная разведка) Lacrosse/Vega, Lacrosse/ONYX с высокой разрешающей способностью (около 1 м) и ее непрерывной модернизацией по мере расширения орбитальной группировки (запуски 1988, 1991, 1997, 1997, 2000, 2005). Эти PCA регулярно используются военным ведомством США при проведении военных операций. К третьему поколению будем также относить находящиеся в постоянной эксплуатации полнополяриметрические PCA C-диапазона волн ASAR KA ENVISAT-1, а также многорежимный поляриметрический PCA Radarsat-2 (декабрь 2007), поляриметрический PCA L-диапазона волн PALSAR KA ALOS, выведенный на орбиту 24.01.2006.

Наконец, к *четвертому поколению* относится целая «гроздь» космических PCA гражданского и военного применения с метровым и субметровым разрешением: TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed 1/4, TecSAR, SAR Lupe (2007–2008 гг.), TanDem-x (2010 г.) и др., а также планируемые системы ближайшего будущего.

Рассмотренный научно-технический задел включает выполненные ранее, но по ряду причин не доведенные до регулярной эксплуатации образцы аппаратуры ДЗЗ, а также перспективные отечественные и зарубежные проекты.

В данной главе дан обзор характеристик космической аппаратуры радиолокационного землеобзора, включая действующие образцы, перспективные проекты, а также проекты, которые создали научно-технический задел для совершенствования средств радиолокационного наблюдения. В ходе изложения материала обращено внимание на элементы рассмотренного в гл. 12 подхода к проектированию космической аппаратуры, которые можно найти в разработках как отечественных, так и зарубежных систем землеобзора космического базирования.

## 13.2. Некогерентные космические радиолокаторы бокового обзора для наблюдения океана и надводной обстановки

### 13.2.1. Некогерентные РБО контроля надводной обстановки. Бортовой комплекс «Чайка»

Впервые в мире были разработаны и введены в эксплуатацию космические радиолокаторы бокового обзора применительно к системе морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ) [88\*, 545]. В нее входил активный космический аппарат УС-А с бортовым спецкомплексом (БСК) всепогодной радиолокационной разведки «Чайка». БСК включал в себя широкозахватный космический радиолокатор бокового обзора (РБО) и бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ), способные при работе в автоматическом режиме производить обнаружение и определение координат надводных кораблей с передачей информации на наземные или корабельные командные пункты.

Общий вид КА показан на рис. 13.1, а также на рис. Ц.6 цветной вкладки в конце книги (демонстрационный комплект КА УС-АМ). На рис. 13.2 представлен фрагмент графической регистрации надводной обстановки на пультах операторов-потребителей радиолокационной информации.

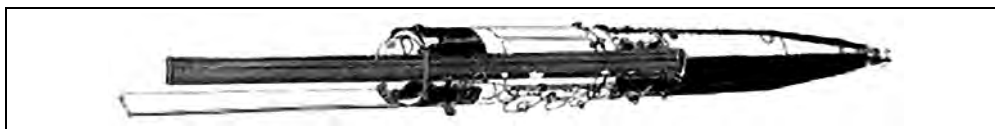


Рис. 13.1. Общий вид КА УС-АМ с двумя антеннами РБО, реализующими двусторонний обзор морской поверхности

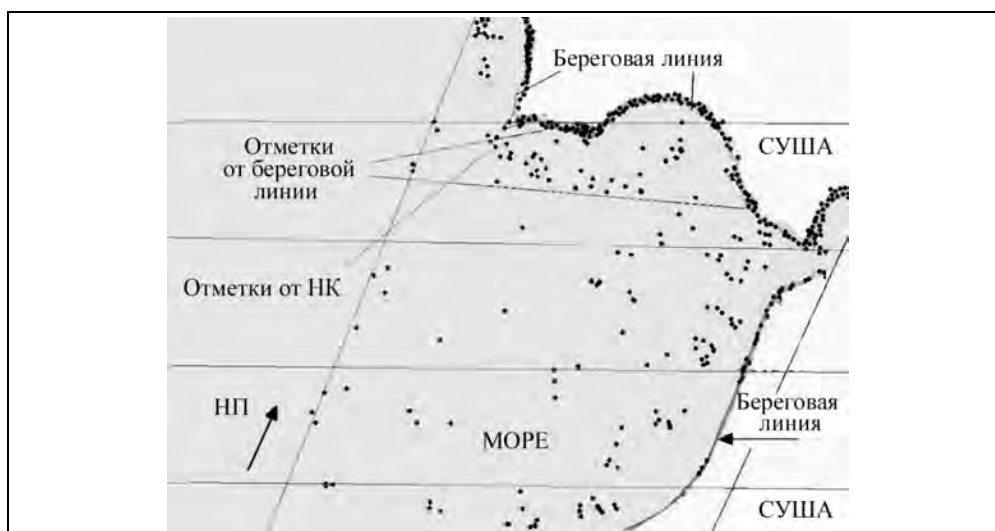


Рис. 13.2. Вид графического отображения надводной обстановки, принятой от БСК «Чайка» (отображаются отметки от надводных кораблей и судов, а также отметки от береговой линии; НП – направление полета)



В состав радиолокатора, работающего в трехсантиметровом диапазоне волн, входили две (в первых образцах – одна) хорошо komponующиеся на КА двухсекционные складные волноводно-щелевые антенны с размерами 10,0×0,7 м, мощный магнетронный передатчик, чувствительный приемник с СВЧ-усилителем. Электропитание радиолокатора осуществлялось от бортовой атомной электростанции. В западных источниках аппаратура КА УС-А имела название RORSAT (Radar Ocean Reconnaissance Satellite) – спутник радиолокационной разведки океана, достаточно близко характеризующее назначение комплекса.

Система МКРЦ была принята в 1975 году. Серийный выпуск и успешная эксплуатация БСК «Чайка» реализована в составе 28 аппаратов УС-АМ в течение 1971-1988 гг. («Космос-402», «Космос-516», «Космос-1700», «Космос-1900» и др.).

Высокая эффективность созданной системы МКРЦ особенно ярко проявилась летом 1982 года во время англо-аргентинского конфликта из-за Фолклендских (Мальвинских) островов. Система полностью отслеживала обстановку на море и по полученной от системы информации Главным штабом ВМФ был определен момент начала высадки английского десанта. Система МКРЦ явилась первой системой космической разведки и целеуказания по морским целям, не имевшей аналогов до последних лет.

В ходе разработки, испытаний, эксплуатации БСК «Чайка» и модернизации аппаратуры были выявлены ряд моментов, учет которых может способствовать повышению надежности и эффективности перспективных разработок.

На первых образцах РБО применяли волноводно-щелевую антенну бегущей волны с коммутируемой запиткой волноводов антенны с противоположных сторон СВЧ-сигналами, имеющими разные фазовые распределения в вертикальной плоскости антенны. Это позволяло формировать два луча (ближний и дальний) как прототип режима Скансар, реализованного позже в РСА. Такое экономное построение антенны РСА может быть оправданным для малых спутников ледовой разведки, применяющих сигналы с узкой полосой. Для РСА с широкополосными сигналами использование антенны с бегущей волной непригодно, поскольку оно приводит к качанию луча за время зондирующего импульса.

1. Выявлено, что использование в передатчике магнетрона с мощной магнитной системой приводит к вращению спутника при взаимодействии с магнитным полем Земли. Исключить это явление удалось путем разворота основного и резервного передатчиков друг относительно друга на 180° для компенсации магнитного момента.

2. На более поздних комплексах РБО, где устанавливались передатчики с повышенной мощностью, были зафиксированы пробои в СВЧ-тракте. Тогда это явление объясняли выделением газов из конструкционных материалов, которое приводит к локальному повышению давления со снижением электропрочности в соответствии с кривой Пашена. Много позже стало ясно, что проявлялся мультипакторный эффект ускорения электронов в волноводах под действием СВЧ-поля в вакууме с выбиванием вторичных электронов.

3. Выяснилось, что благодаря технологическим запасам при разработке составляющих подсистем бортового комплекса суммарное энергопотребление (а значит и тепловыделение) аппаратуры оказалось значительно меньше расчетного и спутник «замерзал». Пришлось устанавливать дополнительные электронагреватели. В связи с этим фактом в проектируемой аппаратуре целесообразно предусматривать возможность работы РЛС (основного потребителя электроэнергии) в форсированных режимах с целью полного использования ресурсов КА для повышения тактико-технических характеристик системы РЛН.

4. Для повышения надежности широко применялось холодное резервирование основных блоков БСК в сочетании со схемами горячего резервирования. Правильность такого подхода к проектированию космической РЭА была подтверждена и в последующих разработках. Подтвердилась также целесообразность введения в аппаратуру многочисленных контрольных и калибрующих датчиков в сочетании с наземной автоматизированной контрольно-измерительной аппаратурой.

5. Выявлен на первый взгляд неожиданный факт возможности распознавания класса корабля по количеству отметок на выходе цифрового обнаружителя, а также о подчеркивании береговой линии путем сгущения отметок. Это явление повышало точность определения координат кораблей.

6. При использовании X-диапазона волн обнаружилось сильное отражение от гидрометеоров, особенно в экваториальных широтах, резко снижающее вероятность обнаружения кораблей и подстилающей поверхности. Для исключения таких потерь желателен переход на более длинные волны или принятие специальных мер, например, использования сигналов двух поляризаций или с круговой поляризацией.

7. Для обеспечения высокого энергетического потенциала РБО на спутнике была установлена ядерная энергетическая установка. Система ядерной безопасности имела дублированную защиту: систему увода радиационно-опасной части спутника на высокую орбиту «высвечивания» при окончании срока эксплуатации и средства «распыления» ядерных компонентов при падении спутника. Поэтому даже полная авария спутника «Космос-954» с падением остатков от спутника на территорию Канады в 1977 г. не создали серьезной угрозы для населения [88\*, 575]. В настоящее время принципы использования ядерных энергетических установок в космосе и необходимые меры безопасности утверждены ООН, и интерес к созданию космических радиолокаторов с ядерными источниками питания сохраняется [56, 439\*].

### **13.2.2. Космические РБО для исследования морской поверхности, ледяного и ледникового покровов**

При разработке комплекса «Чайка» не рассматривался вопрос о расширении функций аппаратуры (сверх технического задания на нее) с целью ее адаптации для обзора земной поверхности применительно к мониторинговым задачам ледовой разведки, метеорологических исследований состояния океана, обнаружения тайфунов и др.

Создание этой важной для страны системы было позже поручено Харьковскому институту радиоэлектроники (радиолокатор) и КБ «Южное» (космический аппарат). Эксплуатация этого типа РБО – космической системы «Океан-01» началась в 1983 г. с эксперимента на КА «Космос-1500» в рамках программы «Океан» [12, 197].

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Основными задачами эксперимента являлись:

- 1) отработка методов дистанционных исследований Мирового океана и поверхности Земли в интересах народного хозяйства и науки;
- 2) отработка новых видов информационно-измерительной аппаратуры;
- 3) проведение оперативной съемки ледяных покровов Арктики и Антарктики для обеспечения навигации в замерзающих акваториях.



**Рис. 13.3.** Общий вид КА серии «Космос-1500», «Океан-01» с РБО для исследования океана

Бортовой комплекс радиофизической аппаратуры КА включал в себя РБО X-диапазона волн, сканирующий СВЧ-радиометр ( $\lambda=0,8$  см), трехканальный трассовый СВЧ-спектрометр ( $\lambda=0,8/1,35/8,5$  см, разрешение 17/20/85 км), устройство обработки сигналов, а также информационный радиотелевизионный комплекс. Наиболее ценная информация, независимая от погодных условий и времени суток, могла быть получена с помощью РБО X-диапазона волн с разрешающей способностью изображений 1,5...2,0 км в полосе по дальности 450 км.

Аппарат функционировал на орбите высотой 650 км с наклоном 82,5°. Требуемое положение спутника в пространстве обеспечивалось трехосной гравитационной системой ориентации и стабилизации в орбитальной системе координат (ОСК) с точностью 2...3° и 0,02 град/с соответственно. Общий вид КА этой серии показан на рис. 13.3. Характеристики РБО КА «Космос-1500» приведены в табл. 13.1.

**Таблица 13.1. Параметры РБО серии «Космос-1500», «Океан-1»**

Параметр	Значение	Примечание
1	2	3
Высота орбиты КА, км	650	
Наклонение, град	82,5	
Период обращения КА, мин	97,5	
Диапазон волн, см	3,1	
Тип и размеры антенны (горизонталь×вертикаль), м	Волноводно-щелевая с рупорным излучателем 11,085×0,04	Складная, 5 секций, сечение волноводов 23×10 мм
Ширина ДНА, град:		
по азимуту	0,2	Установка антенны 35° от надира
по углу места	42	
Уровни боковых лепестков, дБ	-(22...25)	Аподизация «косинус на пьедестале»

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

Продолжение табл. 13.1

1	2	3
Коэффициент усиления, дБ	35	
Поляризация излучения и приема	Вертикальная	
Режимы работы	Маршрутный	
Углы падения, град	20...60	Обзор левым бортом
Полоса съемки, км:	475	
Разрешение, км		
азимут	2,1...2,5	
дальность	0,9...0,6	
Число наблюдений	8	
Шумфактор приемника, дБ	~2	
Динамический диапазон приемника, не менее, дБ	30	Три ступени регулировки усиления
Длительность зондирующего импульса, мкс	3	
Частота повторения, Гц	100	
Мощность излучения в импульсе, кВт	100	Магнетрон
Чувствительность, $\sigma_{\text{не}}^0$ , дБ	-20	
Полоса аналогового радиоканала передачи информации, кГц	2	Частоты: 137,4 МГц
	5	и 486 МГц
Потребляемая мощность РБО, Вт	400	

Для калибровки сквозного тракта используется пилот-сигнал, полученный от ослабленного излучаемого импульса, задержанного на 8 мкс с помощью акустической линии на алюмоиттриевом гранате с ослаблением ~80...85 дБ. В составе выходной информации из пилот-сигнала формируется яркостной клин, 8 градаций.

На борту КА обеспечивались формирование РЛИ с некогерентным накоплением восьми наблюдений, сжатие динамического диапазона данных для согласования с аналоговыми радиопередачами информации. По дециметровый радиолинн (частота 486 МГц, полоса 5 кГц) информация поступала на приемные центры Госкомгидромета СССР в Москве, Хабаровске и Новосибирске. Метровая радиолиния (частота 137,4 МГц, полоса 2 кГц) служила для передачи данных на сеть автономных приемных пунктов непосредственным потребителям на судах, в удаленных районах и т.д.

Опыт длительного использования радиолокаторов этого типа подтвердил важность получения регулярной информации о морской поверхности и ледовой обстановке. Однако для решения этих задач необходимо лучшее пространственное разрешение, что требует применения РСА.

### 13.3. Ретроспективный обзор развития космических РСА

#### 13.3.1. РСА космического аппарата SEASAT

Первым космическим радиолокатором с синтезированной апертурой антенны для дистанционного зондирования Земли был РСА, входящий в состав бортовых датчиков КА SEASAT, разработанного фирмой JPL, США. КА был выведен 26 июня 1978 г. на близкую к круговой орбиту высотой около 800 км с наклоном 108°

### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

[565, 569]. РСА работал в  $L$ -диапазоне волн (1275 МГц). Космический аппарат был предназначен для проведения исследований Мирового океана с использованием РСА. Первоначальной задачей была демонстрация возможностей глобальной системы для мониторинга океана, получения информации о приводном ветре, характеристиках морского волнения и ледового покрова, топографии льда и морской поверхности. Но в ходе эксплуатации РСА задача была расширена с получением снимков земной поверхности, давших ценную информацию для развития методов ДЗЗ.

Несмотря на короткий срок функционирования РСА (99 суток, из-за замыкания в цепях питания) был собран обширный материал, который обрабатывался и изучался специалистами разного профиля в течение многих лет. Полученный объем (около



Рис. 13.4. Общий вид КА SEASAT

42 ч съемки) радиолокационных снимков океана и земной поверхности составил  $110 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup> (~11000 условных кадров 100×100 км) общей площадью 85 % поверхности Земли, включая повторные съемки.

В состав бортовой аппаратуры кроме РСА входили: радиолокационный альтиметр ( $Ku$ -диапазон, точность высотометрии 10 см), сканирующий многоканальный СВЧ-радиометр (частоты 6,6; 18; 37; 10,7 и 21 ГГц, полоса съемки 600 км), скаттерометр ( $L$ -диапазон, точность измерения скорости ветра  $\pm 2$  м/с), а также радиометры оптического и ИК-диапазонов. Работой каждого из бортовых датчиков управляли разные организации. Общий вид КА SEASAT показан на рис. 13.4, на котором видна геометрия взаимного расположения панелей солнечных батарей (вверху), антенны РСА (внизу справа) и антенн скаттерометра (система антенн в нижней части КА). Аппарат был ориентирован в орбитальной системе координат (ОСК).

Аппарат был ориентирован в орбитальной системе координат (ОСК).

В РСА использовалась волноводно-щелевая антенна с общей запиткой размером 10,7 м по горизонтали и 2,2 м в угломестной плоскости. Поляризация излучения – горизонтальная. Полоса зондирующего сигнала 19 МГц, длительность ЛЧМ-импульса 33,4 мкс, импульсная мощность 1 кВт, частота повторения зондирующего сигнала 1463...1640 Гц.

Сводные данные по космическим РСА первого поколения приведены в табл. 13.2. Полоса съемки РСА 100 км была фиксирована относительно надира с углами падения в пределах 17...23°. Расчетное пространственное разрешение 25×25 м при четырех наблюдениях. Выходную информацию РСА (радиоголограмму) записывали на четыре бортовых магнитных запоминающих устройства и передавали по радиолинии с производительностью 110 Мбит/с (5 бит на слово).

Для синтеза РЛИ в большинстве случаев использовали оптическую обработку радиоголограммы. Выходные РЛИ регистрировали на 70-мм фото пленку полосами по 25 км, при этом разрешение составляло 70...80 м. Синтез РЛИ, реализованный с помощью цифрового процессора фирмы JPL позволил обработать около 10 % данных в течение 1978–1982 гг., пока процессор не вышел из строя. При цифровом синтезе РЛИ имели полную полосу съемки 100 км и разрешающую способность 25 м. Все обработанные РЛИ архивированы и доступны для распространения. В процессе функционирования PCA SEASAT был организован прием информации наземными станциями в США, Канаде, Англии.

Полученные РЛИ в *L*-диапазоне волн в разных районах земного шара стали основой для развития методов тематической обработки радиолокационной информации. В частности, выяснилась возможность обнаружения по радиолокационным снимкам внутренних волн, создаваемых движением погруженных подводных лодок, что не предполагалось до запуска PCA SEASAT на орбиту [566]. Исследования возможностей радиолокационной съемки в *L*-диапазоне волн были продолжены с помощью PCA SIR-A и SIR-B в составе многоразового космического корабля (КК) Space Shuttle.

### **13.3.2. Космические PCA *L*-диапазона волн SIR-A, SIR-B, JERS-1**

#### **PCA SIR-A, SIR-B многоразового космического корабля Space Shuttle**

Проведенные на КА SEASAT исследования по радиолокационному зондированию Земли в *L*-диапазоне волн были продолжены на запусках многоразового космического корабля Space Shuttle в 1981 г. (SIR-A) и 1982 г. (SIR-B). Эти запуски явились последовательным шагом в программе набора и систематизации характеристик многочастотного поляриметрического зондирования Земли [284]. По своим характеристикам эти PCA были близки к PCA SEASAT с отличием по высоте орбиты, углам падения, полосе съемки и реализуемому разрешению. Аппаратура SIR-B представляла собой усовершенствованный вариант SIR-A. Основные параметры PCA SIR-A и SIR-B приведены в табл. 13.2.

В PCA SIR-B высота орбиты в процессе полета снижалась с 360 до 224 км. В отличие от SIR-A в SIR-B было обеспечено управление лучом антенны по углу места в пределах 15...60° от надира с шагом 1°. Это позволило перенацеливать положение полосы съемки относительно следа КА. Реализуемые углы падения 15,5...63,7° на малых высотах (224 км) и 15,8...66,2° на больших высотах орбиты (360 км) могли сопровождаться повышением интегрального уровня неоднозначности на больших дальностях, что могло снижать качество получаемых РЛИ. Поэтому указанное в табл. 13.2 значение полосы съемки (до 600 км) может оказаться завышенным.

Полное время съемки в PCA SIR-B составило 7 ч (4600 условных кадров 40×40 км). По всем полученным данным был выполнен цифровой синтез РЛИ и их архивирование. В эксперименте принимала участие группа специалистов по геологии, возобновляемым ресурсам, океанологии и методам калибровки аппаратуры.

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

**Таблица 13.2. Характеристики космических РСА обзора земной поверхности L- и S-диапазонов волн**

Космический аппарат	SEASAT	КК Space Shuttle	JERS-1	«Космос-1870»	«Алмаз-1»
1	2	3	4	5	6
Аппаратура РСА	SAR	SIR-A/SIR-B		«Меч-К»	«Меч-КУ»
Фирма, страна разработчик КА	Lockheed, Ball Space System, США	США	NASDA, Япония	НПО машиностроения, СССР	
Фирма, страна разработчик РСА	JPL, США	JPL, Ball Aerospace Comm. Syst. Div., США	Япония	НПО «Вега», СССР	
Назначение	Исследования	Исследования	Исследования	Исследования	
Высота орбиты КА, км	800	259/(360; 257; 224)	568	260	275
Наклонение, град	108	38/57	97,7	72,7	72,7
Период обращения КА, мин	102,85	~90	96	~90	~90
Периодичность повторения трасс, сутки (витки)	–	–	44 (659)		
Рабочий диапазон волн (частота)	L (1275 МГц)	L (1275 МГц)	L (1275 МГц)	S (3130 МГц)	
Тип и размер антенны, м	Волноводно-щелевая 10,7×2,16	Волноводно-щелевая (9,4/10,7)×2,16	Неуправляемая ФАР 11,9×2,4	Волноводно-щелевая стоячей волны, трехсекционная, 15×1,5	
Режимы работы	Маршрутный	Маршрутный	Маршрутный	Маршрутный	
Углы падения, град	17...23	53/(15,5...66,2)	35	40...55	30...65
Направление обзора			Правосторон.	Двусторонн.	Двусторонн.
Полоса обзора, км	100	50/(420...600)	75	2×300	2×350 (проект)/400, правый борт (факт)
Полоса съемки, км	100	50/(20...40)	75	20	45/200 (эксперим.)
Периодичность наблюдения, сутки	8			4	3/5
Поляризация	Горизонт.	Горизонт.	Горизонт.	Горизонт.	Горизонт.
Разрешение, м: азимут дальность	25 (70...80) <sup>Д</sup> 25 (70...80)	40/(58...16) 40/(20...30)	18 18	25...30 25...30	10...15 (12...15)/ (15...20)
Полоса зондирующего сигнала, МГц	19	6/12	15	10	14/10
Число наблюдений	4	6/4	3	1	1
Радиометрическое разрешение, дБ	2	1,7/2	6	3	3
Уровень неоднозначности, дБ	-20	–	–	-20	-20
Чувствительность РСА $\sigma_{не}^0$ , дБ	-30	-30		-33	-30/-33
Длительность зондирующего импульса, мкс	33,4	30,4	35	0,1	0,07/0,1

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

Продолжение табл. 13.2

1	2	3	4	5	6
Частота повторения, Гц	1463...1640	1464...1624	1500	3000	3000
Импульсная мощность, кВт	1	1/1,12	1,3	250	250
Ориентация КА	ОСК	ОСК	ОСК	ПСК	ПСК
Разрядность радиоголограммы		8 / 4 (BFPQ)	3	5	5
Бортовая память	Магнитное ЗУ	Оптическое ЗУ/30,4	72	Аналоговое магнитное ЗУ	6 магнитных цифровых ЗУ
Передача данных по радиолинии	110 Мбит/с	Доставка после посадки КК	60 Мбит/с	Аналоговая 6 МГц	Цифровая, через спутник-ретранслятор 10 Мбит/с
Обработка информации	Оптическая/цифровая	Оптическая/цифровая	Цифровая	Оптическая	Цифровая
Запаздывание информации, сутки	Непосредственная передача	8		~1+непосредственная передача	~0,25
Год реализации	1978	1981/1982	1992–1998	1987–1989	1991–1992
Расчетный срок службы, лет	1...3	полет ~8 суток	6 (факт)	2	2/(1,5 – факт)

Примечание: <sup>1)</sup> при оптическом синтезе РЛИ.

**Японская программа JERS.** Космический аппарат JERS-1, разработанный японским космическим агентством NASDA, был предназначен для глобальной съемки поверхности Земли (включая Антарктиду) для решения широкого круга прикладных задач, особенно исследования геологических явлений, землепользования, наблюдения прибрежных районов, геологического картирования, мониторинга катастроф, а также с целью оценки возможностей межвитковой интерферометрии для выявления изменений в обстановке [215]. Основной полезной нагрузкой космического аппарата являлись два датчика – PCA *L*-диапазона волн SAR-L с пространственным разрешением 18 м и оптическая система OPS (Optical sensor), работающая в видимом и ИК-диапазонах спектра. Оптические оси двух камер были смещены одна относительно другой вдоль линии пути на 15,3°, что позволяло осуществлять непрерывную стереосъемку поверхности Земли.

Аппарат был выведен на солнечно-синхронную орбиту 11 февраля 1992 г. Средняя высота орбиты 568 км, наклонение 97,7°. КА функционировал в течение 6 лет до октября 1998 г., когда произошел отказ бортовой системы электропитания.

Наземный сегмент включал в себя центр управления полетом NASDA в г. Цукуба и центры обработки, распределения и архивирования данных ЕОС (Earth Observation Center) в Хатояма, Япония и Фербенксе, Аляска, США. Кроме того, информация могла передаваться на Международную сеть приемных пунктов: Кумаото (Япония), Кируна (Швеция), Гатина (Gatineau, Канада), Маспаломас (Испания), Бангкок (Таиланд), Тромсё (Норвегия), Принс Альберт (Канада), Пекин (Китай), Suoya (японская станция в Антарктиде), Belconnen (Австралия). Система ориентации КА поддерживала положение осей КА в ОСК с погрешностями не более  $\pm 0,3^\circ$ .

Общий вид КА показан на рис. 13.5. Параметры КА и PCA приведены в табл. 13.2.





**Рис. 13.5.** Общий вид КА JERS-1

### **13.3.3. РСА «Меч-К», «Меч-КУ» космических аппаратов «Космос-1870» и «Алмаз-1»**

**РСА «Меч-К» КА «Космос-1870».** Принципы построения космических РСА были разработаны в 1963–1965 гг. практически независимо в СССР и за рубежом. Первоначально в СССР была выполнена разработка космического РСА «Меч-А» (МНИИП, НПО «Вега», ныне ОАО «Концерн «Вега») для орбитальной пилотируемой станции (ОПС) «Алмаз» [552]. Предусматривалось участие экипажа ОПС в обслуживании аппаратуры РСА, в состав которой входило бортовое фоторегистрирующее устройство для записи радиолограммы на восьмисантиметровую фотопленку. Периодически раз в три месяца кассеты с записями подлежали сбросу в капсулах на Землю, где должен был обеспечиваться синтез РЛИ с помощью машины оптического преобразования информации (МОПИ). В задачу экипажа входили перезарядка кассет с фотопленкой, их установка в капсулу, а также контроль работоспособности бортовой аппаратуры с помощью индикатора бортового контроля (ИБК) с встроенным осциллографом. При обнаружении отказа оператор мог переключить аппаратуру на резервные блоки.

Научно-технический задел, полученный при создании аппаратуры РСА с управлением операторами, был использован для создания полностью автоматического варианта РСА «Меч-К», предназначенного для ведения видовой разведки. Запуск РСА «Меч-К» был осуществлен 15.07.1987 в составе КА «Космос-1870». Ресурс работы системы (2 года, до 29.07.1989) был ограничен запасами топлива на поддержание высоты орбиты КА и коррекцию электромеханической системы ориентации осей КА в ПСК.

Бортовая аппаратура РСА включала две волноводно-щелевые антенны (левого и правого бортов), расположенные вдоль корпуса КА, резервированный когерентный приемопередатчик, устройства запоминания информации (аналоговые ви-

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

деомагнитофоны с полосой 6 МГц) и аналоговую радиолинию (также с полосой 6 МГц) для передачи радиолокационной информации на Землю. Каждая из антенн размерами 15×1,5 м состояла из трех секций с центральной запиткой для формирования стоячей волны. Перед пуском секции складывались в пакет на малом диаметре КА. Внешний вид антенн в раскрытом состоянии виден на снимке (рис. 13.6). Кроме указанных устройств в состав бортовой аппаратуры входили измеритель доплеровской частоты (ИДЧ), блоки синхронизации, контроля и управления РСА.

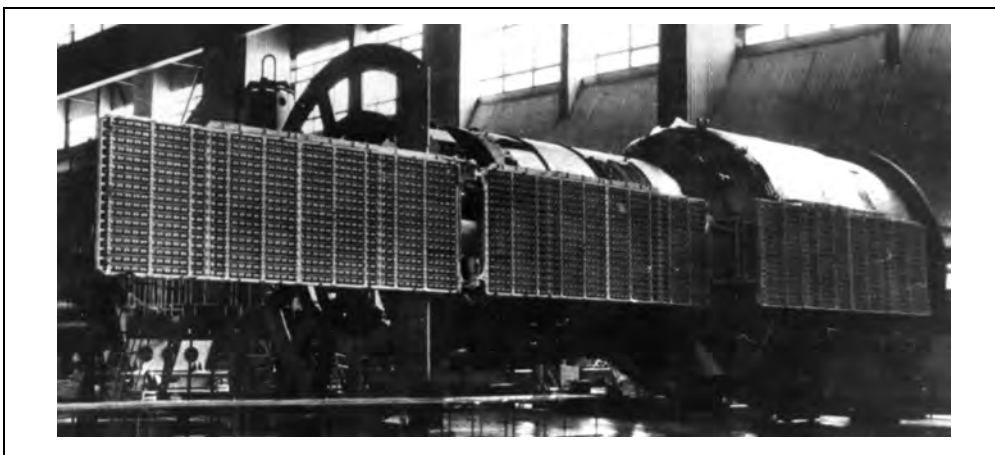


Рис. 13.6. Общий вид КА «Космос-1870» в сборочном цехе

Структурная схема РСА имела ряд особенностей. Использование оптического устройства для синтеза РЛИ в РСА «Меч-К» требовало работы с одной квадратурной составляющей сигнала со смещением средней частоты спектра доплеровских частот на  $\frac{1}{4}$  частоты повторения сигналов, т.е. на 750 Гц. Это было реализовано путем череспериодного поворота фазы излучаемых сигналов на  $\pi/2$ . Малый динамический диапазон устройства оптической записи радиолограммы ( $\leq 12$  дБ) потребовал применения быстродействующего АРУ с постоянной времени около 30 мкс, что приводило к радиометрическим искажениям, но позволяло эффективно обнаруживать объекты на подстилающих поверхностях с разной УЭПР (кроме пограничных областей, не превышающих 3 км).

Заложенные в РСА серии «Меч» в 1970–1974 гг. технические решения отличались от тех, что были приняты в то время в зарубежных РСА и в ряде случаев были более прогрессивными. Так, для повышения оперативности получения информации использовались две антенны по обоим бортам и перенацеливание полосы съемки с углами падения от 15 до 65° путем поворота КА по крену. Это резко сокращало интервал повторной съемки до 3 сут. Был выбран *S*-диапазон волн, где минимально влияние фазовых нестабильностей атмосферы на синтез апертуры.

В устройстве оптического синтеза РЛИ наземного пункта приема и обработки информации использовалась анаморфотная телескопическая оптическая система, позволяющая путем ее перемещения изменять фокусное расстояние при синтезе

РЛИ. Для устранения фазовых ошибок по апертуре синтеза, вызванных неоднородностью фотоэмульсии, пленочный канал с записанной радиоголограммой заполнялся иммерсионной жидкостью с близким к фотоэмульсии коэффициентом преломления (этиловый спирт). Была реализована разрешающая способность по дальности и азимуту порядка 25...30 м. Для повышения радиометрического разрешения и улучшения наблюдаемости протяженных поверхностей применительно к гражданским задачам ДЗЗ были применены варианты некогерентного накопления РЛИ: со сканирующей апертурой в пленочном канале (внутриэлементное накопление) или путем межэлементного накопления за счет аберраций в оптической системе на криволинейной поверхности вторичной фотопленки (без иммерсии). Это позволяло получать РЛИ с разрешением около 45 м при числе наблюдений 4-5.

По опыту создания предшествующих КА с оптическими датчиками была реализована ориентация КА в путевой системе координат (ПСК), учитывающей вращение Земли. Предложенное разработчиками РСА управление космическим аппаратом с помощью измерителя доплеровской частоты (ИДЧ) позволило снизить ошибки установки луча антенны на нуль доплеровской частоты до 2...3 угл. мин., вместо 0,5...0,7°. Такое решение устраняло миграцию дальности принятых от цели сигналов и значительно упрощало построение наземного устройства синтеза РЛИ как оптического для РСА «Меч-К», так и цифрового для РСА «Меч-КУ». За рубежом к целесообразности ориентации КА в ПСК пришли значительно позже [280], а до того разрабатывали сложные алгоритмы для измерения положения доплеровского центроида ( $\pm 3,5^\circ$  и более по курсу) и коррекции большой миграции дальности.

Ко времени создания РСА отсутствовали мощные бортовые электровакуумные усилители или транзисторные усилители. Поэтому была предложена и реализована схема построения когерентного передатчика с использованием в выходном каскаде фазированного магнетрона, формирующего импульс с пиковой мощностью ~250 кВт и средней мощностью ~80 Вт при длительности импульса 0,07...0,1 мкс и частоте повторения 3000 Гц. В этом варианте сравнительно с клистронным усилителем мощности имеется выигрыш по массе и КПД, а требования к стабильности частоты магнетрона при коротком импульсе легко реализуются, а начальная фаза с точностью долей радиана совпадает с фазой колебаний высокостабильного кварцевого опорного генератора, усиленных с помощью предварительного клистронного усилителя и поданных на вход магнетрона с уровнем на 25 дБ ниже уровня выходного сигнала магнетрона. Применение зондирующего сигнала в виде коротких импульсов (а не широкополосных ЛЧМ или ФМ-сигналов) способствовало улучшению изобразительных свойств РЛИ (отсутствие «крестов», вызванных боковыми лепестками импульсного отклика РСА).

Требуемая длительность одного маршрута съемки составляла от 3 до 30 с. В этих условиях магнетрон работал в переходном тепловом режиме на выбеге частоты до 3 МГц. В самолетном аналоговом комплексе РСА, рассчитанном на непрерывную работу, магнетрон пришлось перестраивать. Изменение фазы излучения на выбеге частоты оказалось незначительным и не сказывалось на синтезе РЛИ, но аналогичные явления должны учитываться при проектировании перспективных РСА с высоким разрешением.

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

Наличие фазированного импульса длительностью  $\sim 0,8$  мкс создавало пьедестал, искажающий радиолокационные портреты ярких компактных целей (корабли, инженерные сооружения). Устранение влияния пьедестала достигалось специальной технологией повышения качества радиолокационной информации [429\*].

В течение двухлетней эксплуатации РСА «Меч-К» на КА «Космос-1870» функциональные блоки, входящие в РСА, работали на основном комплекте, кроме аналоговых видеоманитрофонов, которые были очень сложными изделиями в связи с необходимостью компенсации линейных деформаций движущейся магнитной ленты (допускалась ошибка не более 0,02 %). Наличие режима непосредственной передачи радиолокационной информации на пункт приема в радиусе до 3000 км (время сеанса связи около 8 мин) позволило сохранять живучесть системы после отказов ЗУ. В перспективе должна предусматриваться передача бортовой информации на распределенную сеть приемных пунктов, в том числе корабельного базирования.

За время эксплуатации РСА было выполнено много целевых программ в интересах военных и гражданских потребителей. Высокая информативность зондирования в S-диапазоне волн, который не применяется в зарубежных РСА землеобзора, была подтверждена в ходе эксплуатации космических аппаратов «Космос-1870» и «Алмаз-1», включая совместные эксперименты с РСА AIRSAR, SIR-C/X-SAR, ERS-1/2 [63\*, 78, 92, 166\*, 232\*, 242, 474, 522].

**РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1».** Рассмотренный в разделе 12.1 системный подход к проектированию космических РСА был использован при создании РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1» в процессе его модернизации по результатам эксплуатации РСА «Меч-К». При согласовании технического задания (ТЗ) на РСА «Меч-КУ» с улучшенными характеристиками были согласованы с Заказчиком более жесткие требования, но вместе с тем было предусмотрено такое управление аппаратурой, которое расширяло ее возможности, не гарантируя определенного качества РЛИ. Эти экспериментальные режимы использовались при выполнении различных программ дистанционного зондирования Земли (например, исследования морской поверхности), проверки путей совершенствования аппаратуры РСА.

В частности, решался вопрос о расширении полосы съемки и полосы обзора для перенацеливания полосы съемки относительно следа КА. При проектировании пилотируемого варианта РСА «Меч-А» требуемая по ТЗ полоса съемки соответствовала ширине фотопленки бортового фоторегистратора (8 см). При замене регистратора на видеоманитрофон в РСА «Меч-К» не стали переделывать синхронизатор для расширения полосы съемки сверх заданной в ТЗ, хотя это позволяло повысить оперативность наблюдения. В процессе испытаний РСА «Меч-К» рассматривалась возможность расширения полосы обзора в сторону меньших и больших дальностей с частичным ухудшением качества РЛИ, допустимым для решения задач гражданских потребителей. Однако получить РЛИ на больших дальностях не удалось, так как объектив МОПИ упирался в заднюю стенку МОПИ.

В ходе НИР, предшествующих запуску РСА «Меч-КУ», были предложены и промоделированы *методы снижения помех неоднозначности* путем рандомизации зондирующего сигнала (см. раздел 8.2), которые предполагалось проверить в лет-

ном эксперименте. Была специально предусмотрена съемка морской поверхности с неоднозначностью сигналов по дальности. К сожалению, недостаток финансирования не позволил изготовить блок рандомизации. Тем не менее, возможность использования в перспективных РСА режимов с частичной неоднозначностью сигналов для повышения оперативности наблюдения была подтверждена. Для идентификации принадлежности обнаруженных целей к разным зонам неоднозначности использовался признак расфокусировки.

Модернизация РСА «Меч-КУ» включала замену бортового аналогового ЗУ на цифровые магнитофоны и использование цифровой линии передачи данных на Землю через спутник-ретранслятор. Слежение за спутником обеспечивала антенна типа АФАР, которая видна на рис. 7.45 цветной вкладки в выдвинутом положении, готовая к раскрытию. Вместо оптического (кроме первого этапа) был реализован наземный цифровой синтез РЛИ с использованием многопроцессорной ЭВМ ПС-2000.

Следует отметить, что на первом этапе эксплуатации РСА «Меч-КУ» при оптическом синтезе РЛИ было отмечено улучшение разрешающей способности по наклонной дальности до 15 м по сравнению с реализованным в РСА «Меч-К» (~20 м). Это объяснялось заменой аналоговых магнитофонов и аналоговой радиолитии с полосами по 6 МГц на цифровые радиолитию и магнитофоны с частотой дискретизации сигнала 28,8 МГц. Этот факт свидетельствует о том, что традиционное для задач обнаружения правило о согласовании полосы приемника с полосой сигнала является не лучшим техническим решением, когда требуется высокое пространственное разрешение, определяемое совокупностью характеристик звеньев радиолокационного тракта [207\*].

В РСА «Меч-КУ» были введены следующие *режимы работы, расширяющие возможности радиолокационной съемки*:

1) два режима работы передатчика с длительностями импульса 0,1 и 0,07 мкс (основной) с повышенным разрешением по поперек трассы полета 11...15 м в зависимости от угла падения;

2) два режима АРУ с применением быстродействующей АРУ (постоянная времени 30 мкс) для сжатия динамического диапазона сигналов и медленной АРУ (постоянная времени 3 с), позволяющей передать реальные контрасты отраженного сигнала в выходном РЛИ и обеспечить возможность измерения ЭПР объектов и местности после калибровки тракта РСА. Основная съемка проводилась в режиме быстродействующей АРУ, в котором менее сказывалось ограничение амплитудной характеристики приемника при наблюдении ярких объектов;

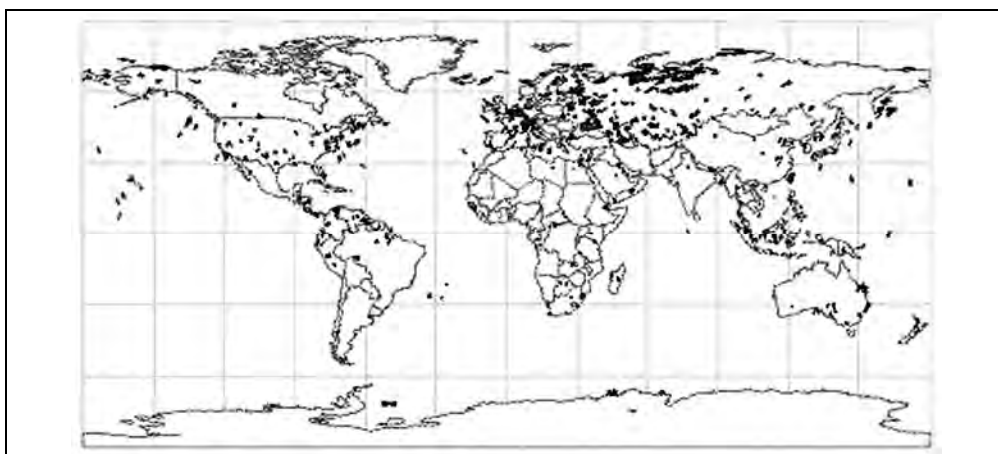
3) два режима преобразования радиоголограммы в цифровую форму: основной – с частотой квантования 28,8 МГц (масштаб по наклонной дальности 5,20833 м) с полосой съемки по наклонной дальности 30,375 км (~45 км по горизонтальной дальности) и расширенный – с частотой квантования 20,05 МГц, масштабом 7,48 м и полосой съемки по наклонной дальности 43,6 км, который позволял принимать отраженные сигналы почти от всего периода зондирования (за вычетом длительности импульса супрессии приемника). В этом режиме проводились эксперименты по расширению полосы обзора в область неоднозначности по дальности.

При разработке РСА «Меч-К», «Меч-КУ» большое внимание уделяли обеспечению и контролю когерентности тракта, для чего использовали специальный измерительный прибор с кварцевой линией задержки 6 мс (возможно также сравнение фаз двух генераторов опорных сигналов, используя основной и резервный комплекты блоков). Современные приборы позволяют вести измерения на несущей частоте сигнала. Для контроля волноводного тракта оказалось полезным встраивание гиперзвуковой СВЧ-линии задержки (ГЗЛЗ) в СВЧ-тракт через направленный ответвитель с потерями 25 дБ. Это позволило иметь пилот-сигнал в виде набора калибровочных импульсов непосредственно после импульса супрессии приемника с декрементом затухания около 3 дБ. Полезно записывать выходной сигнал, начиная со строк шумов, предшествующих приходу отраженного сигнала.

Запуск КА «Алмаз-1» с РСА «Меч-КУ» на орбиту высотой около 270 км и наклонением  $72,7^\circ$  состоялся 31 марта 1991 г. К сожалению, предусмотренный проектом двухсторонний обзор не был реализован, так как не удалось раскрыть антенну левого борта. По-видимому, была виновата излишняя боязнь «человеческого фактора» – в схему управления был заложен автоматический раскрыв сначала первой (задней, см. рис. Ц.7. цветной вкладки) секции антенны, а после откидывания первой секции – включался двигатель третьей (передней) секции антенны. По не установленной причине циклограмма раскрыва нарушилась и секции антенны «сцепились». Отсутствие ручных команд для возвращения ситуации к исходной и последовательного независимого раскрыва секций антенны привело к тому, что полярные области выше  $72^\circ$  с.ш. оказались недоступными для радиолокационной съемки. Съемка этих районов была реализована только в короткий период, когда был выполнен разворот КА на  $180^\circ$  относительно вертикальной оси. В связи с дополнительным расходом топлива было принято мудрое решение о досрочном завершении полета во избежание нештатных ситуаций.

Параметры РСА «Меч-КУ» приведены в табл.°13.2. В ходе эксплуатации КА «Алмаз-1» был накоплен обширный материал по радиолокационному зондированию Земли в *S*-диапазоне волн. Было проведено большое число уникальных экспериментов по зондированию морской поверхности, наблюдению течений, поверхностных проявлений внутренних волн, совместные многочастотные эксперименты с РСА ERS-1/2, SIR-C/X-SAR. Широко использовалось зондирование под крутыми углами на малых дальностях, где потенциал РСА значительно выше. Каталогизированные архивные материалы радиолокационной съемки хранятся в Центре «Алмаз» ОАО «ВПК «НПО машиностроения» и доступны для распространения и использования [538]. На рис. 13.7 дано расположение кадров радиолокационной съемки с использованием РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1».

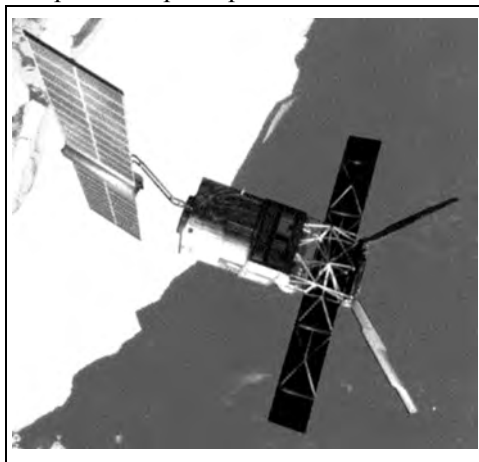
При синтезе РЛИ по радиоголограммам, полученным в режиме быстройдействующей АРУ, необходима специальная коррекция радиометрических искажений, методика которой рассмотрена в разделе 11.9. Выходные РЛИ, включая комплексные РЛИ для интерферометрической обработки, должны регистрироваться в форматах (целый 16-битовый или плавающий), исключающих ограничение отметок от ярких целей, как это рассмотрено в гл. 7.



**Рис. 13.7.** Места расположения кадров радиолокационной съемки с помощью РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1» [538]

#### **13.3.4. Программа ERS космического агентства ESA**

Космические аппараты ERS-1, ERS-2 (рис. 13.8) предназначены для глобальных измерений характеристик океанов, для составления метеопрогнозов, наблюдений



**Рис. 13.8.** Космический аппарат ERS-2

за состоянием поверхности океана и ледового покрытия, исследований прибрежных зон и зондирования поверхности суши [215]. В проекте принимали участие 13 государств Европы и Канада. Основной полезной нагрузкой КА ERS-1 был СВЧ-прибор AMI-SAR (Active Microwave Instrument – Synthetic Aperture Radar), который мог работать в режиме РСА (получение РЛИ) и в режиме скаттерометра (измерение характеристик ветров и морских волн). Пассивный радиометр ИК- и СВЧ-диапазонов ASTR (Along-Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder) обеспечивал высокоточное измерение температуры океана, а радиолокационный высотомер *Ku*-диапазона RA (Radar Altimeter) – топографические характеристики поверхности океана и ледового покрытия. Прецизионный радиодальномер PRARE (Precise Range and Rate Equipment) обеспечивал точные траекторные измерения. В КА ERS-2 были установлены модернизированный радиометр ATSR-2, а также прибор для изучения озонового слоя GOME (Global Ozone Monitoring Experiment).

В состав системы ERS входили космический сегмент и наземный комплекс, состоящий из центра управления полетом, центра обработки и архивирования дан-

ных и сети из 33 приемных станций. По плану ERS-2 был предназначен для продолжения сбора данных после выхода из строя ERS-1 и до запуска РСА нового поколения КА ENVISAT-1. В процессе эксплуатации оба спутника превысили расчетные сроки функционирования, что позволило кроме увеличения объема полученных данных провести совместную (ERS-1 и ERS-2, а позже и с ENVISAT-1) работу с проведением радиолокационной интерферометрической съемки одних и тех же участков местности. Орбиты КА были сформированы таким образом, чтобы один из КА пролетал по трассе другого на следующие сутки. При этом база интерферометрии не превышала 600 м, что обеспечивало когерентность получаемых РЛИ. Совместные полеты имели большое научное и практическое значение для отработки методов интерферометрии с «мягкой базой» для задач построения карт рельефа и других приложений (см. раздел 9.7).

Радиолокационный комплекс AMI-SAR работает в С-диапазоне частот (5,3 ГГц) в одном (маршрутном) режиме с фиксированной полосой съемки (100 км), вертикальной поляризацией в пределах углов падения 17...23°. Параметры РСА приведены в табл.°13.2.

### **13.3.5. Многорежимный РСА С-диапазона волн Radarsat-1**

Коммерческий космический аппарат Radarsat-1 был специально спроектирован для съемки местности в интересах широкого круга пользователей. Основные задачи, решаемые с его помощью – глобальные всепогодные наблюдения за состоянием ледового покрытия и растительности, оценка урожайности сельскохозяйственных угодий, мониторинг районов стихийных бедствий, геологоразведка, лесопользование, исследование береговой зоны, океанология, обнаружение айсбергов [215].

Космический аппарат был выведен 04.11.1995 на солнечно-синхронную орбиту высотой 798 км (поддерживается с точностью 10 км), углом наклона 98,6° с периодом обращения 100,7 мин. Местное время пересечения экватора в восходящем узле орбиты 18:00, период повторения трасс порядка 24 сут. Благодаря работе на солнечно-синхронной орбите, продолжительность работы на витке достигает 28 мин. Расчетный срок эксплуатации 5 лет, находится в эксплуатации более 14 лет.

Начальная масса КА 2749 кг, масса полезной нагрузки 1366 кг. Мощность солнечных батарей составляла 3000 Вт при запуске на орбиту со снижением до 1900 Вт после трех лет эксплуатации. Аппарат ориентирован в орбитальной системе координат, точность трехосной системы ориентации 0,1°. Общий вид КА Radarsat-1 приведен на рис. 13.9.

Бортовой многорежимный РСА работает в С-диапазоне волн (частота 5,3 ГГц, длина волны 5,8 см). РСА оборудован волноводно-щелевой фазированной антенной решеткой (ФАР) размером 15×1,5 м. Ширина луча в горизонтальной/угломестной плоскостях соответственно 0,2 и 3,5...6,5°. Поляризация излучения и приема – горизонтальная. Луч может устанавливаться в 25 положениях по углу места, изменяя угол падения в пределах 10...59°. Сектор электронного сканирования по углу места 25°. Коэффициент усиления антенны 40 дБ, время перенацеливания луча составляет 10 мин. Ширина спектра зондирующего сигнала в разных режимах



### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

11,6 МГц, 17,3 и 30 ГГц. Длительность зондирующего импульса 42 мкс, частота повторения 1270...1390 Гц. Ширина полосы съемки составляет 25...500 км в зависимости от режима работы. Мощность передатчика – средняя 300 Вт, пиковая 5000 Вт. В передатчике применена лампа бегущей волны.

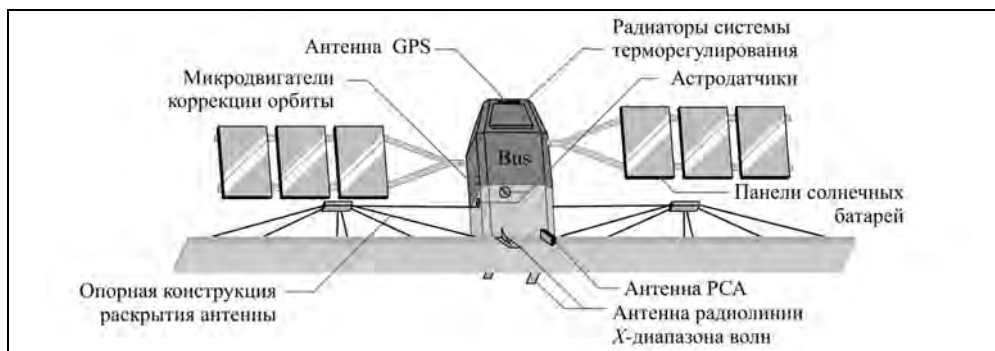


Рис. 13.9. Космический аппарат Radarsat-1

#### **В РСА реализовано восемь режимов работы:**

- 1) стандартный в пределах углов падения  $20...49^\circ$  с полосой съемки 100 км, разрешением азимут×дальность  $28 \times 25$  м, 4 наблюдения;
- 2) расширенные режимы с полосой съемки 160 км и разрешением  $28 \times (30...48)$  м;
- 3) обзорные режимы Скансар с полосой съемки 510 и 305 км и разрешением  $100 \times 100$  м и  $50 \times 50$  м при 2 или 4 наблюдениях;
- 4) детальный режим съемки с полосой 45 км (углы падения  $37...48^\circ$ ) реализует пространственное разрешение  $9 \times (8...11)$  м при одном наблюдении.

В некоторых режимах реализуется обработка с комбинацией некогерентного накопления сигналов, как по азимуту, так и по дальности.

В штатном режиме полета антенна ориентирована для съемки местности справа (к северу) от трассы полета КА. Ежесуточный обзор всего региона Арктики и полный обзор районов, размещенных в пределах  $49...70^\circ$  северной широты, обеспечивается в течение 3 суток. Левосторонний обзор для изучения ледового покрова Антарктиды реализуется разворотом КА.

Характерно, что первоначально кроме этих рабочих режимов были предусмотрены экспериментальные режимы съемки с приближением к надиру (углы падения  $10...23^\circ$ ) и удаленные от надира (углы падения  $50...60^\circ$ ). После проверки они вошли в штатную эксплуатацию как «расширенный ближний» (разрешение  $28 \times (63...28)$  м) и «расширенный дальний» (разрешение  $28 \times (22...19)$  м) – оба с четырьмя наблюдениями по азимуту. Благодаря этим режимам и применению разворотов КА по крену общая полоса обзора (перенацеливания) увеличена до  $2 \times 925$  км (вместо 500 км при одностороннем обзоре). Расширение полосы обзора может оказаться очень важным при мониторинге катастроф для получения экстренной информации, недоступной в данное время другим средствам дистанционного зондирования.

Отметим также, что ориентация КА в ОСК привела к сложностям синтеза РЛИ, особенно в режиме Скансар. Были разработаны специальные программы слежения за средней доплеровской частотой сигнала (положением доплеровского центроида), позволяющие избежать азимутальной неоднозначности сигналов. Изменения доплеровской частоты из-за вращения Земли достигали 14 кГц, значительно превышая частоту повторения сигнала (~1,3 кГц).

Передача информации на Землю ведется в реальном времени на одну из шести станций со скоростью 85 Мбит/с или с бортовых ЗУ (емкость 2×72 Гбит) со скоростью 10 Мбит/с. Продолжительность сеанса передачи данных 10...14 мин.

В публикациях, посвященных анализу результатам 10-летней эксплуатации аппаратуры, отмечалась высокая стабильность параметров РСА [287, 288, 336].

### **13.3.6. Космические РСА видовой разведки серии Lacrosse**

Разработка космических РСА в интересах ЦРУ началась в США в 1978 году по программе Indigo [72, 125, 126, 215, 570]. Создаваемая система спутников радиолокационного наблюдения дополняла спутники оптико-электронной разведки Keyhole (КН) и была предназначена для решения задач всепогодной круглосуточной детальной видовой разведки стратегических объектов (в том числе авиационных, военно-морских и ракетных баз, аэродромов и портов), включая слежение за перемещениями мобильных ракетных комплексов и ударных бронетанковых частей вооруженных сил зарубежных стран. Основными потребителями были высшее военно-политическое руководство США, ведомства, входящие в структуру разведывательного сообщества, и вооруженные силы. С начала 1990 г. в ходе реорганизации структуры разведывательного сообщества США создаваемые спутники Lacrosse были перенацелены на решение задач вооруженных сил США и НАТО [215].

До запуска ИСЗ военного назначения использовалась информация гражданских спутников SEASAT, SIR-A, SIR-B. Первый экспериментальный спутник радиолокационной разведки INDIGO-1 (KEYHOLE-8-49 Gambit) был выведен на (нестандартную) орбиту высотой около 600 км в 1982 г. На этом модифицированном КА фотографической разведки, функционировавшем в течение 122 сут, были проведены орбитальные испытания разворачиваемой в космосе крупногабаритной антенны.

В 1988 г. начата эксплуатация первого ИСЗ радиолокационной разведки Lacrosse/Vega на орбите 680 км с наклоном 57°. Далее последовали запуски спутников Lacrosse-1 (03.12.1988-23.05.1997), Lacrosse-2 (08.03.1991), Lacrosse-3 (24.10.1997), Lacrosse-4 (17.08.2000), Lacrosse-5 (30.04.2005).

В состав орбитальных группировок входят пары спутников, размещенных на круговых орбитах высотой около 700 км с разными наклонами 57° (Lacrosse-1 и заменивший его Lacrosse-3) и 68° (Lacrosse-2, Lacrosse-4, Lacrosse-5). Периоды обращения спутников 95,5...98,6 мин. Основным подрядчиком по КА является компания Lockheed Martin Astronautics, а по наземному сегменту – General Electric.

Для РСА прорабатывались разные варианты построения антенны. Первоначально в составе РСА предусматривалась установка показанной на рис. 13.10 зеркальной антенны с облучателем типа фазированной антенной решетки (по-ви-

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

димому, АФАР) [519]. Рассматривались варианты с зеркалами полукруглой или полуэллиптической формы. Согласно данным [125] использовалась антенна Касегрена с параболическим зеркалом диаметром 15...17 м и с облучателем типа ФАР. Углы обзора находятся в пределах 30...60°, время перенацеливания – около 15 с. Реализация сканирования луча в зеркальной антенне на углы, превышающие ширину луча в 150 раз (в каждую сторону), представляет собой сложную проблему, требующую применения АФАР облучателя [206].

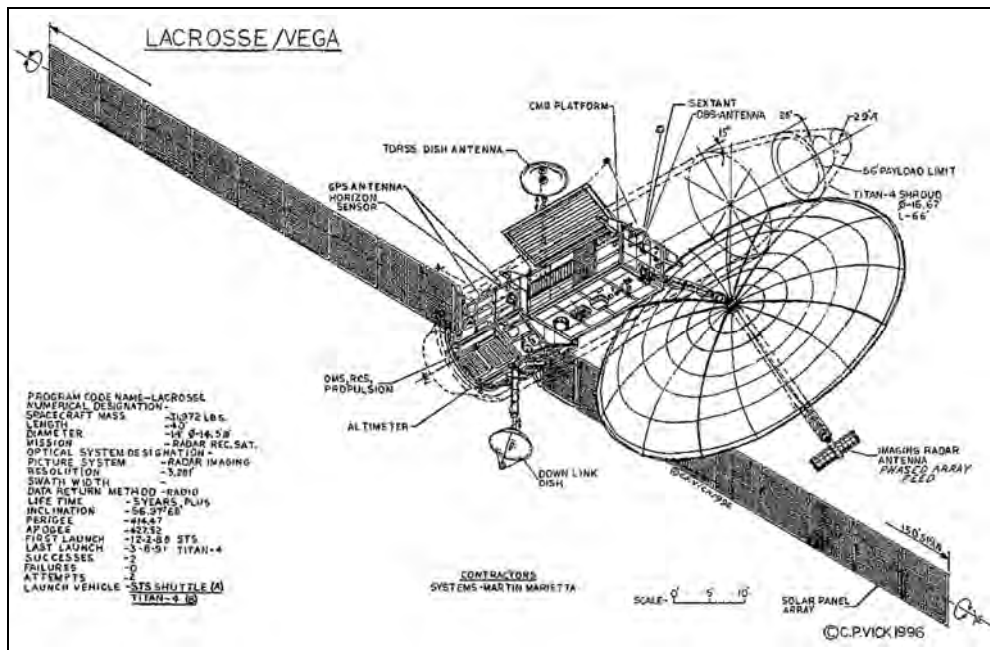


Рис. 13.10. Конструктивная схема ИСЗ «Lacrosse/Vega» [125]

РСА работает в диапазоне частот 9,5...10,5 ГГц (X-диапазон), импульсная мощность излучения составляет 1500 Вт при длительности импульса 10...50 мкс, средняя мощность излучения равна 400 Вт. Источник питания – солнечные батареи. На первых образцах КА они имели размер 50 м и обеспечивали 10...20 кВт мощности. По опыту эксплуатации позже размеры батарей и энергопотребление были снижены. Расчетный срок службы аппаратуры составлял пять лет (реальные сроки – значительно больше).

Высокое разрешение по дальности достигается путем использования широкополосных зондирующих импульсов, а по азимуту – большим временем синтеза при работе в прожекторном режиме. Основные режимы работы (рис. 13.11) включают в себя маршрутный (стандартный луч), обзорный (широкозахватный луч) и прожекторный (лучи высокого разрешения) режимы. Характерно наличие экспериментального режима с большими углами падения, в которых возможно появление неоднозначности сигналов по дальности.

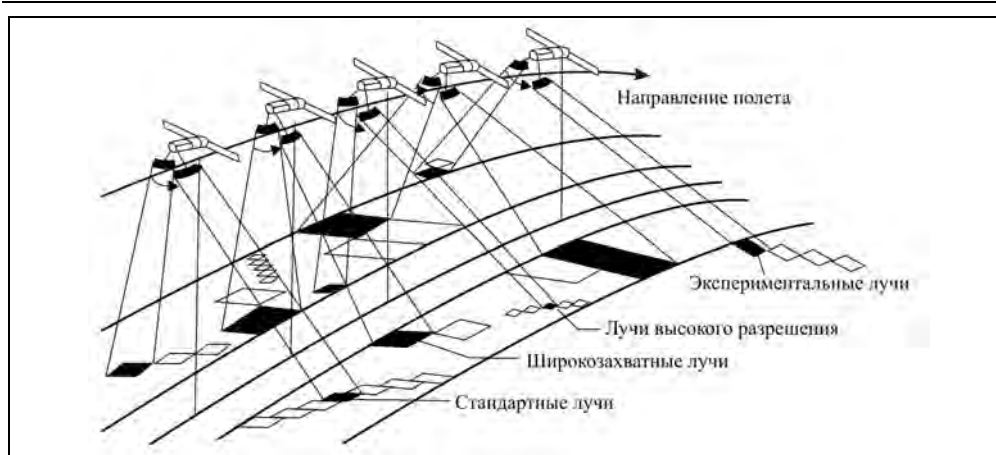


Рис. 13.11. Режимы съемки PCA «Lacrosse/Vega» [125]

В прожекторном режиме реализуется разрешающая способность 0,6...1,0 м при размере кадра на местности (2...5)×(2...5) км. В маршрутном покадровом режиме с высоким разрешением (2...3 м) размер кадра составляет (6...20)×(6...20) км, а в маршрутном режиме со средним разрешением (3...10 м) ширина полосы съемки составляет 100...200 км. Возможна съемка небольших участков местности с высоким разрешением (0,5...0,6 м) и удаленных до 2200 км. Приведенные данные являются ориентировочными, но подход к выбору режимов близок к реализованному в PCA Radarsat-1, поскольку в разработке режимов для PCA Lacrosse принимали участие канадские специалисты [125].

Конструктивно PCA размещается на КА с диаметром ~4,8 м при длине 14,2 м. Общая масса КА составляет ~12,7 т. Конструкция КА в процессе сборки показана на рис. 13.12. Отмечается серьезный технический прогресс, достигнутый при реализации последних образцов КА Lacrosse/ONYX. Их можно отнести к четвертому поколению PCA [519].

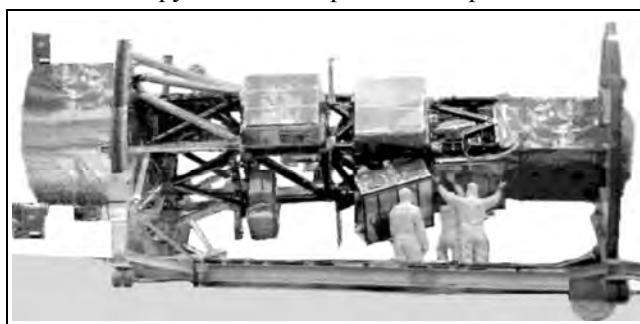


Рис. 13.12. Конструкция КА Lacrosse/ONYX в процессе сборки

Бортовая радиосистема обеспечивает передачу данных от PCA со скоростью около 150 Мбит/с в двух вариантах: в *Ku*-диапазоне частот (13/15 ГГц) через спутники-ретрансляторы TDRSS и далее на наземные станции приема в White Sands, штат Нью-Мексико и в *Ka*-диапазоне частот (20/30 ГГц) путем непосредственной передачи на наземный центр приема в Fort Belvoir, штат Виржиния и приемные пункты в Австралии, Великобритании и на Гавайских островах.

Перспективы развития системы связаны с работами по программам США FIO SBR (бывший Discoverer-2).

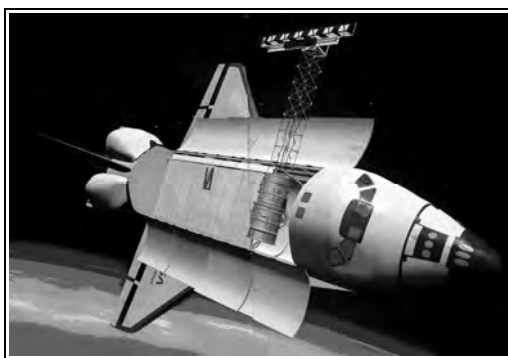
### **13.3.7. Многочастотные поляриметрические PCA SIR-C/X-SAR многоцветного космического корабля Space Shuttle**

Радиолокационные комплексы, размещаемые на многоцветном космическом корабле (КК) Space Shuttle, были предназначены для отработки новых технологий и глобальной радиолокационной съемки Земли в разных диапазонах волн с целью картографирования, изучения состояния и динамики процессов изменения поверхности Земли [215]. Радиолокационный комплекс SRL размещается на открытой платформе Spacelab, устанавливаемой в грузовом отсеке КК Space Shuttle. Аппаратура включает в себя американский двухчастотный PCA SIR-C, работающий в C- и L-диапазонах волн и европейский PCA X-диапазона волн X-SAR. Программа эксплуатации комплекса была рассчитана на три полета с доработкой аппаратуры для расширения задач дистанционного зондирования Земли.

Запуски КК с радиолокационным комплексом были осуществлены в апреле 1994 г. (SRL-1), сентябре – октябре 1994 г. (SRL-2). В результате двух полетов было снято 25 % территории суши с общим временем 133 ч (90 ч – SIR-C и 43 ч – X-SAR), в том числе с применением поляриметрического зондирования в C- и L-диапазонах волн. В последние трое суток полета SRL-2 высота орбиты была скорректирована таким образом, чтобы трассы двух полетов практически совпадали. Были получены данные для интерферометрической обработки с межвитковой базой 10...4700 м и с интервалом времени между съемками около 5 мес.

Эти исследования дали ценную информацию по применению интерферометрии для построения карт рельефа местности, о взаимной когерентности снимков и возможностям дифференциальной интерферометрии.

В феврале 2000 г. был реализован 11-суточный полет SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) со сбором картографической информации методом интерферометрии с жесткой базой для построения карт рельефа местности. Было снято до 80 % поверхности земной суши в пределах от 60° с.ш. до 56° ю.ш. Для проведения



**Рис. 13.13.** Космический корабль Space Shuttle для топографической съемки поверхности Земли (SRTM) [521]

съемок в режиме однопроходной интерферометрии была демонтирована антенна L-диапазона волн и на выделенном месте размещены выдвижной механизм (штанга с полной длиной около 61 м) с двумя приемными антеннами X- и C-диапазонов волн половинного размера.

Высота орбиты КА составляет 200...233 км, наклонение 57°, период обращения 91 мин. На рис. 13.13 приведен общий вид КА в варианте SRTM в момент начала движения штанги с выносными приемными антеннами

**Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...**

X- и C-диапазонов волн. Их горизонтальный размер (6 м) вдвое меньше основных антенн. Для точного определения размеров и угловых отклонений базы интерферометрии была предусмотрена установка на блоке с приемными антеннами лазерных и телевизионных датчиков.

Параметры PCA, входящих в бортовой комплекс, приведены в табл.°13.3.

**Таблица 13.3. Параметры лучей и режимов работы**

Параметр	SIR-C		X-SAR
	PCA-L (для SRL-1, SRL-2)	PCA-C	
Несущая частота излучения, ГГц	1,25	5,5	9,6
Длина волны, см	23,5	5,8	3,1
Ширина спектра сигналов, МГц	19	9,5 и 40	19 и 9,5
Длительность импульса, мкс	8,5; 17; 33		40
Вид модуляции	ЛЧМ		ЛЧМ
Частота повторения, Гц	1200...2160		1395...1736
Тип антенны	АФАР		волноводно-щелевая ФАР
Размеры антенны, м	12×2,95	12×0,75	12×0,4
Поляризация излучаемых и принимаемых волн	Любая комбинация, включая полную: ГГ+ГВ+ВВ+ВГ		ВВ
Поляризационная развязка, дБ	30		
Масса антенны, кг	3300		45
Пространственное разрешение, м:			
азимут	27 6 (наилучшее)	27 3 (наилучшее)	менее 30
дальность	8...15 4 (наилучшее)	8...15 4 (наилучшее)	10...20 до 4
Ширина полосы съемки, км	15...90 (70 – средняя)		15...45
	225 – Скансар		до 60*
Углы падения, град,	15...60		20...55
предельно			до 58*
Режимы съемки	Маршрутный, Скансар, прожекторный		
Импульсная мощность передатчика, Вт	3500	2200	3200
Скорость информационного потока, Мбит/с			45
Система передачи данных	В реальном времени через систему TDRSS (90 Мбит/с) и запись на 3 цифровых магнитофона		

Выходной сигнал радиолокационных каналов квантуется 8-битовыми отсчетами, для дальнейшего сжатия информации применяются алгоритмы блочного квантования с плавающей точкой BFPQ (Block Floating-Point Quantization). В результате обработки блоки данных из 128- и 8-битовых отсчетов преобразуются в последовательность 4-битовых отсчетов, сохраняя исходный динамический диапазон. Четыре цифровых канала по 45 Мбит/с собираются в единый поток 180 Мбит для регистрации в бортовом записывающем устройстве.

#### **13.4. Разработки космических РСА, обеспечившие создание научно-технического задела**

##### **13.4.1. Многорежимный космический РСА LightSAR для малого КА**

Космическая система радиолокационного наблюдения LightSAR (проект) включает в себя бортовой и наземный сегменты.

***Основные требования, предъявляемые к системе:***

- максимальное удовлетворение требований потребителей при минимально достижимой цене;
- быстрый и дешевый доступ потребителей к радиолокационной информации;
- применение передовой технологии для снижения стоимости аппаратуры с повышением ее потребительских качеств;
- обеспечение 5-летнего срока эксплуатации.

***Параметры космического аппарата:***

- высота орбиты 600 км, период обращения 97,6 мин;
  - орбита круговая, солнечно-синхронная, наклонение 97,8°; местное время восходящего узла – 06:00 ч;
  - перекрытие глобального обзора – с периодичностью 10 суток.
- Высокие параметры бортовой аппаратуры (см. табл. 13.14) обеспечиваются
- использованием облегченных панелей антенны (АФАР) с электронным управлением лучом и миниатюризованных приемопередающих модулей с целью снижения массы, потребления и стоимости;
  - применением миниатюрных микроволновых интегральных схем;
  - работой на одной частоте для снижения массы и потребления;
  - минимальной длиной антенны с целью снижения стоимости антенных панелей, механизма развертывания антенны и массы изделия.

***Технические характеристики аппаратуры:***

- рабочая частота: 1,2575 ГГц (*L*-диапазон);
- направление обзора: правое или левое изменением угла крена КА;
- длительность съемки составляет 10 мин/вит в прожекторном режиме и до 30 мин/вит в непрерывном режиме. Ограничивает длительность съемки пропускная способность радиолинии передачи данных;
- длительность импульса: 15, 3 мкс;
- частота повторения: 1600 Гц – номинал (пределы 1200...1700 Гц);

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

- квантование: 8, 4 разряда (формат (BFPQ) и 4 разряда (без BFPQ);
  - мощность: 1,24 кВт (максимальная), в том числе 1,15 кВт – антенна, 90 Вт – электроника (съемка 10 мин на витке в прожекторном режиме);
  - масса: <250 кг (225 кг – антенна, 25 кг – электроника);
  - антенна: 10,8 м (азимут) × 2,9 м (высота), складная, две 4-элементные плоские секции, складывающиеся веером по бокам КА;
  - электронный блок: 10×16×30 см<sup>3</sup> (4800 см<sup>3</sup>);
  - командная / телеметрическая радиолиния с производительностью 1 кбит/с;
  - радиолиния передачи данных – 150 Мбит/с.
- Данные эфемерид спутника включаются в шапку кадра.

Таблица 13.4. Основные характеристики PCA LightSAR

Параметр	Режим					
	Высокого разрешения		Четыре поляризации	Две поляризации	Двух-проходный интерферометр	Скансар
	Прожекторный	Непрерывный				
Разрешение, м	3	6–10	50	25	25	100
Полоса захвата, км	15×20	22	50	50	100	250
Число наблюдений	3	3	10	4	4	8
Угол от надира, град	20–52	20–52	20–40	25–52	25–44	20–52
Поляризации	ГГ или ВВ	ГГ или ВВ	ГГ+ГВ+ +ВВ+ВГ	ГГ+ГВ или ВВ+ВГ	ГГ или ВВ	ГГ+ГВ или ВВ+ВГ
Чувствительность $\sigma_{не}$ , дБ	-20	-20	-30	-25	-25	-25
Полоса сигнала, МГц	80	80	10, 15	10, 15	15	2,5
Скорость передачи данных, Мбит/с	150	150	120	60	60	40

#### 13.4.2. Двухчастотный PCA «Траверс» модуля «Природа» космической станции МИР

В июне 1996 г. был введен в эксплуатацию научный модуль «Природа» орбитальной станции МИР [544]. Модуль «Природа» был предназначен для дистанционного зондирования Земли и был оборудован целым рядом многоспектральных датчиков, в том числе двухчастотным комплексом PCA «Траверс», разработки ОКБ МЭИ. Составной частью двухчастотного PCA «Траверс» была зеркальная антенна размером 6×3 м и два радиолокационных канала S- и L-диапазонов волн. Задачей станции МИР было проведение систематического дистанционного зондирования разных районов Земли и набор данных. Двухчастотный двухполяризационный комплекс «Траверс» был предназначен для анализа типов и состояний растительного покрова Земли, измерения влажности почв, топографирования поверхности, определения шероховатости снежного и ледового покровов [215, 539].

Основные параметры двухчастотного PCA «Траверс» приведены в табл.°13.5. Общий вид зеркальной антенны PCA с передающими блоками в составе облуча-

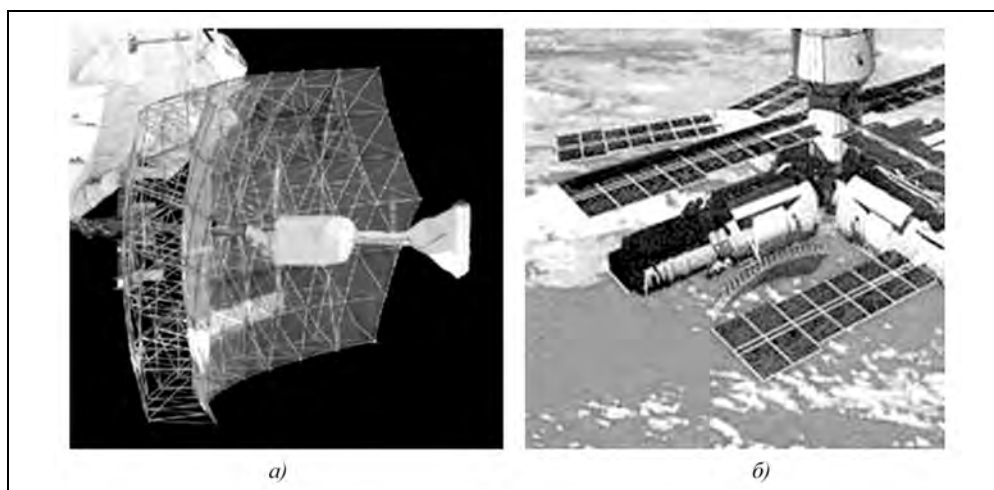


### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

теля антенны, а также размещение модуля «Природа» на станции МИР показаны на рис. 13.14.

**Таблица 13.5. Основные характеристики двухчастотного РСА «Траверс»**

Параметр	Значение	
	РСА-S	РСА-L
Несущая частота, МГц (длина волны, см)	3,28 (9,14)	1,28 (23,44)
Поляризация	ГГ или ВВ	
Угол от падения, град	38	
Полоса съемки, км	50	
Разрешение, м	100	
Ширина спектра сигналов, МГц	5	
Длительность импульса, мкс	25	
Частота повторения импульсов, Гц	3000	
Поток формируемых данных, Мбит/с	15	



**Рис. 13.14.** Зеркальная антенна РСА «Траверс» (а) и размещение модуля «Природа» в составе станции МИР (б)

При разработке РСА «Траверс» был использован технический задел, полученный при создании радиолокатора для автоматических межпланетных станций «Венера 15/16». Эти станции функционировали на эллиптической орбите Венеры с высотами в пределах 1000...65000 км с наклоном 85° и периодом обращения 24 ч. РСА работал в 8-сантиметровом диапазоне волн, использовал антенну с размерами 6×14 м и обеспечивал разрешающую способность 1...2 км (нефокусированный синтез РЛИ) при полосе съемки 150 км и длине маршрута до 9000 км. Успешно выполненная программа радиолокационной съемки поверхности Венеры позволила выпустить Атлас карт Венеры, содержащий ценную информацию по геологическим особенностям планеты [24].

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

Однако для решения задачи землеобзора требовалась серьезная модификация аппаратуры, особенно в части реализуемой разрешающей способности. К сроку ввода в эксплуатацию модуля «Природа» (1996) были доступны для исследований и широкого практического использования радиолокационные снимки с разрешающей способностью 30 м (РСА Seasat-A – с 1978, SIR-C/X-SAR – с 1994, ERS-1/2 – с 1991). Поэтому РЛИ с разрешением 100 м, полученные с РСА «Траверс», оказались невостребованными.

#### 13.4.3. Многочастный бортовой радиолокационный комплекс КА «Алмаз-1В»

Пример реализации принципа наращивания сложности аппаратуры с одновременным расширением ее возможностей – проект бортового радиолокационного комплекса (БРЛК) ЭКОР-1В КА «Алмаз-1В». Его технические характеристики приведены в табл.°13.6 [55], а общий вид показан на рис. 13.15. При разработке БРЛК был принят ряд ключевых решений, исходя из принципов системного подхода к проектированию РСА. В БРЛК по левому борту предусмотрен обзор с помощью двух каналов – РСА S-диапазона волн и РСА/РБО X-диапазона. Используются волноводно-щелевые антенны по типу антенн РСА «Меч-К» и космического РБО «Космос-364». По правому борту осуществлялся обзор с помощью РСА S- и P-диапазонов волн. В антенной системе применены три зонтичных зеркальных антенны размером 3×6 м, разработанных для РСА «Траверс» космического модуля «Природа» станции МИР [55]. Хотя в трехзеркальной антенне усложнена задача формирования ДНА с малыми боковыми лепестками, но наличие отработанных образцов и технологического оборудования явилось определяющим в выборе типа антенны.

Таблица 13.6. Технические характеристики БРЛК ЭКОР-В КА «Алмаз-1В»

Параметр	Тип		
	РСА-3	РСА-10	РСА-70
Высота орбиты, км	400		
Угол наклона орбиты, град	73		
Длина волны, см	3,49	9,58	69,8
Углы наблюдения, град	25–51	25–51	25–51
Направление обзора	влево	влево/вправо	вправо
Полоса обзора, км	330	330	330
Полоса съемки, км	20–35	30–45 / 60–170	120–170
Поляризация	ВВ	ГГ/(ВВГ+ГТВ)	ВВГ+ГТВ
Разрешение:	РСА/РБО		
по дальности, м	5–7 / 150	5–7 / 22–40	22–40
по азимуту, м	5–7 / 2500	5–7 / 15	15
радиометрическое, дБ	0,5	0,5 / 1	1
УЭПР шумового эквивалента, дБ	–25	–25 / –33	–33
Поток информации (РСА/РБО), Мбит/с	240 / 1	2×120	2×240
Энергопотребление, Вт	2300	2300	2300
Масса антенн, кг	320 / 260		
Масса аппаратуры без антенн, кг	1500		

### Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

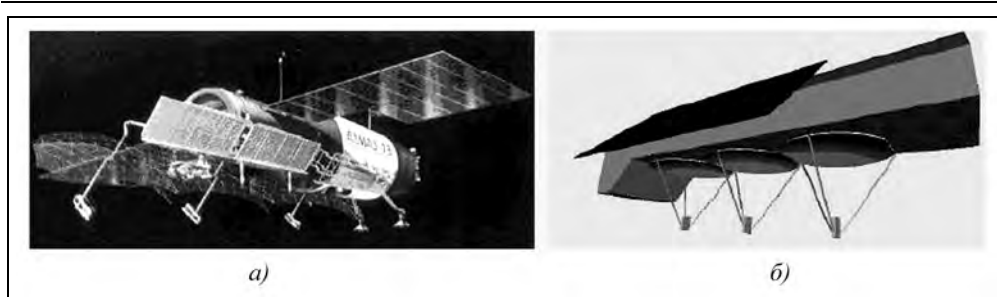


Рис. 13.15. Общий вид проекта КА «Алмаз-1В» с трехчастотным БРЛК (а) и аналогичное построение антенного устройства в РСА *Ku*-диапазона фирмы Astrium GmbH (б)

Хотя данная разработка не была реализована, она позволила создать необходимый технический задел для совершенствования космических РСА. Предложенное оригинальное решение построения антенн способствовало развитию техники РСА не только в России, но и за рубежом. Иллюстрацией может служить проект космического РСА *Ku*-диапазона волн ( $\lambda=1,75$  см) для наблюдения снежного покрова (отличие сухого и влажного снега), где принято явно заимствованное решение для антенного устройства (см. рис. 13.15,б).

#### 13.4.4. Многочастный поляриметрический бортовой радиолокационный комплекс «Аркон-2»

КА «Аркон-2» разработки НПО им. С.А. Лавочкина оборудован тремя радиолокаторами – сантиметрового *X*-диапазона волн (Спинар-1) и дециметровых *L*- и *P*-диапазонов волн (БРЛК «Спинар-1ДМ»), реализующих разрешающую способность от 1-2 м до 30 м [47\*, 125, 126, 548]. Задачи, решаемые радиолокационным комплексом: природопользование, оценка ледовой обстановки, поиск и разведка ископаемых, проведение гидро- и гляциологических наблюдений, создание и обновление цифровых топографических карт, создание и обновление кадастров сельскохозяйственных земель и природных ресурсов, мониторинг экологических процессов.

Радиолокационный комплекс предусматривал возможность оперативно получать данные об объектах, не обнаруживаемых визуально (скрытых снегом, листвой деревьев, замаскированных, заглубленных), определять скорость движущихся объектов, применять интерферометрические технологии для получения данных о рельефе местности, использовать поляриметрические характеристики объектов для дешифрирования радиолокационных снимков и др.

Параметры бортового радиолокационного комплекса космического аппарата «Аркон-2» приведены в табл.°13.7, общий вид КА показан на рис. 13.16. На рис. 13.17 показан общий вид совмещенной АФАР *L*- и *P*-диапазонов волн БРЛК «Спинар-1ДМ».

В дециметровых каналах *L*- и *P*-диапазонов «Спинар-1ДМ», разрабатываемых ОАО «Концерн «Вега», используется совмещенная двухчастотная АФАР с возможностью работы с полным набором поляризаций ВВ + ВГ + ГГ + ГВ (см. табл. 13.7), а в *P*-диапазоне еще и с круговой поляризацией.

Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

Таблица 13.7. Параметры бортового радиолокационного комплекса КА «Аркон-2»

Параметр	Диапазон волн		
	X (3 см)	L (23 см)	P (69 см)
Высота орбиты, км	500...600		
Поляризация при приеме и передаче	ВВ/ВГ/ГГ/ГВ	ВВ+ВГ+ГГ+ГВ	
Направление обзора	вправо/влево от трассы КА		
Полоса съемки, км	2...10	15...400	60...120
Полоса обзора, км	450	450	250
Разрешающая способность, м	1...1,5	3...30	30
Радиометрическое разрешение, дБ	1,2...3,5		
Чувствительность, $\sigma_{\text{пе}}^0$ , дБ			-23

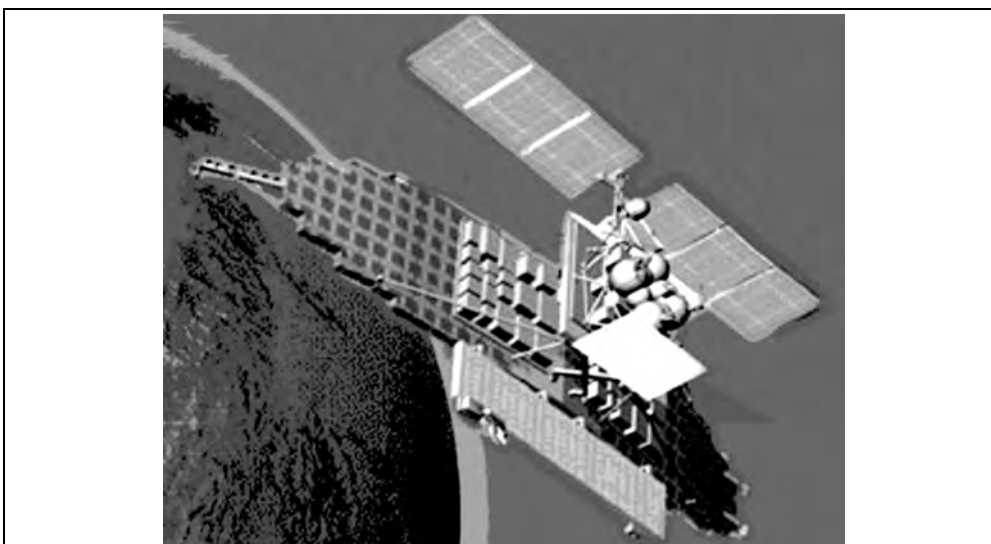


Рис. 13.16. Общий вид КА «Аркон-2» с антеннами РСА «Спинар-1» и БРЛК «Спинар-1ДМ» бортового радиолокационного комплекса

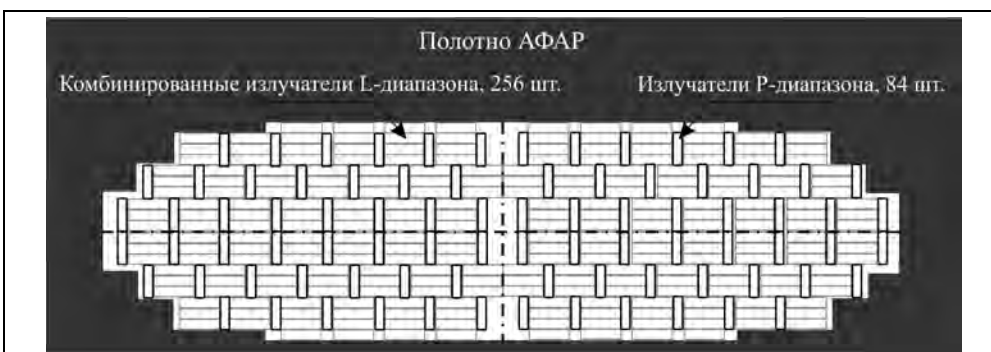


Рис. 13.17. Общий вид совмещенной АФАР L- и P-диапазонов волн БРЛК «Спинар-1ДМ»

### **13.5. Состояние и перспективы развития РСА землеобзора космического базирования**

Современные этапы развития космических радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли характеризуются созданием радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны третьего и четвертого поколений, включая проекты РСА космического базирования [51, 53, 64, 72, 127, 534, 550, 571]. На предыдущих стадиях были выполнены эксперименты по оценке информативности радиолокационных изображений (РЛИ), получаемых из космоса в разных диапазонах волн ( $X$ ,  $C$ ,  $S$ ,  $L$ ), с разными поляризациями. Получены количественные данные по отражающим характеристикам подстилающей поверхности [522], разработаны технологии и алгоритмы когерентной обработки радиолокационной информации, включая построение цифровых карт рельефа, измерения малых (сантиметровых) подвижек земной коры, оценку изменения обстановки на объекте наблюдения. Внедрены в действующую аппаратуру и программное обеспечение обработки материалов радиолокационной съемки специфические для космических РСА режимы работы, адаптированные для пользовательских задач: общего и геологического картирования, исследования природных ресурсов, мониторинга растительного покрова, океанологии, ледовой разведки, обеспечения судовождения, а также контроля зон локальных конфликтов и обеспечения военных операций, мониторинга чрезвычайных ситуаций и сопровождения спасательных работ. Кроме основных режимов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предусматривают выборочную съемку участков морской поверхности.

До последних лет, кроме РСА военного назначения Lacrosse, в котором реализовано метровое разрешение, действующие космические РСА, в основном, были пригодны для решения задач исследования природных ресурсов, мониторинга растительного покрова и океана: наилучшее разрешение 11 м обеспечивается в РСА Radarsat-1. В поляриметрических РСА третьего поколения ENVISAT/ASAR, PALSAR/ALOS, Radarsat-2 возможно получение РЛИ с разрешением 3...10 м.

Современная концепция проектирования космических РСА предусматривает создание многофункциональных многорежимных, поляриметрических РСА, позволяющих получать радиолокационные изображения (РЛИ), пригодные для поляриметрической и интерферометрической обработки и позволяющие получать радиолокационные снимки с высоким пространственным разрешением в непрерывном маршрутном режиме, с наивысшим разрешением в прожекторном режиме или в режиме двойного приема (0,5...1 м) и со средним разрешением в широкозахватном режиме Скансар. Тенденцией развития радиолокационных систем землеобзора космического базирования является использование радиолокационных датчиков в составе орбитальных группировок (танделы TerraSAR-X и Radarsat-2/3, группировки KA SAR Lure, Cosmo SkyMed и др.), которые существенно расширяют возможности ДЗЗ и повышают оперативность наблюдения за счет сокращения времени повторного наблюдения и интегрирования получаемых данных в глобальной информационной системе. Параметры РСА приведены в следующих подразделах (см. табл.°13.9–13.13). Сводные данные по современным космическим РСА и ближайшей перспективе приведены в табл.°13.8 (см. также табл. 13.12–13.15).

Таблица 13.8. Параметры современных и перспективных космических РСА

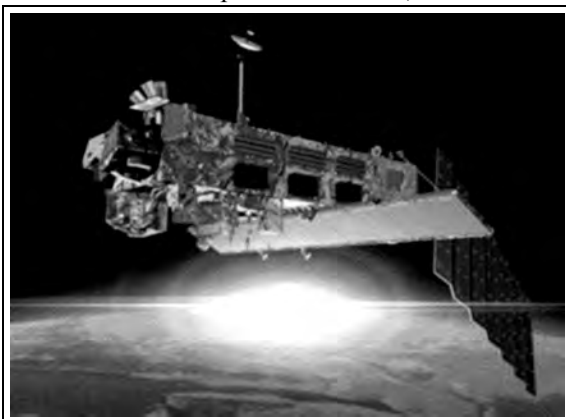
Диапазон волн	X			C		L	
	ТетраSAR-X	TECSAR	Radarsat-2	RISAT-1	ТетраSAR-L	ALOS	РСА PALSAR
Космический аппарат	ТетраSAR-X	TECSAR	Radarsat-2	RISAT-1	ТетраSAR-L	ALOS	РСА PALSAR
Аппаратура РСА							
Высота орбиты КА, км	514	550	798	609	500±630	692	
Наклонение, град	97,4	143,3	98,6		97,9	98,16	
Тип и размер антенны, м	АФАР 4,8×0,8	3А, диам. ~3	АФАР 15×1,4	АФАР 6×2	АФАР 11×2,6	АФАР 8,9×3,5	
Режимы работы <sup>1)</sup>	MP, ПР, СС, Пол	MP, ПР, СС, Пол	MP, ОР, ДР, РР	MP, ПР, Пол, СС	MP, СС	MP, ДР, СС, НП, Пол	
Углы падения, град	20...55 (MP, ПР) 20...45 (СС)		20...50 (MP, ОР, Пол, СС)	20...48	15...38 (2 пол.) 15...32 (4 пол.)	8...60 (ДР, НП, Пол) 18...43 (СС)	
Полоса обзора, км	15...60 (макс)		30...40 (ДР) 10...60 (РР)	10...54 (макс, без гарантии качества РЛИ) 400			
Полоса (кадр) съемки, км	30 (MP) 5×15/10×15 (ПР) 100 (СС)		100 (MP) 150 (ОР) 45 (ДР) 305/510 (СС) 70/170 (РР)	макс 600 30 (MP, Пол) 10×1 (ПР)0 120/240 (СС)	MR: 40/60 CC: ≤200	до 870 СС: 250...360	
Поляризация	2 пол. ГТВ/ВВГ/ГТ+ +ВВ	2 пол., 4 пол.	2 пол., 4 пол.	MP, ПР, СС; ГТВ/ВВГ Пол: 4 пол.	2 пол., 4 пол.	ГТ/ВВ ГТВ/ВВГ	
Разрешение азимут×дальность, м	3×3 (MP) ≤1×1,2/2×1,2 (ПР) 15×16 (СС)		25×28 (MP, ОР) 3×3 (ДР) 9/25 (Пол) 50/100 (СС) (20/40)×28 (РР)	3×3 (MP) ≤2×2 (ПР) 12×12 (Пол) 25×25/50×50 (СС)	(9×9)/(15×15)	(7...10)×(10/20) (ДР) 100×100 (СС) 24...89 (Пол) 14...89 (НП)	
Средняя мощность излучения, Вт	400			400	400		
Чувствительность, NESZ, дБ	-(19...30)				-(30...35)		

Примечания: MP – маршрутный, ДР – детальный, КР – кадровый, ПР – прожекторный, СС – Скансар, РР – расширенный, Пол – поляриметрический, СВ – режим съемки морских волн, НП – непосредственная передача данных.

В большинстве современных и проектируемых РСА землеобзора космического базирования предусматривается получение разрешения снимков от 1...3 м, что пригодно для эффективного решения задач военной разведки и мониторинга чрезвычайных ситуаций.

### **13.5.1. Поляриметрический РСА С-диапазона волн ASAR космического аппарата ENVISAT**

Космический аппарат ENVISAT (Environment Satellite), показанный на рис. 13.18,



**Рис. 13.18.** Общий вид КА ENVISAT

предназначен для продолжения программы регулярного радиолокационного зондирования Земли, начатой с использованием КА ERS-1 и ERS-2 в интересах широкого круга пользователей [215, 369, 438, 479, 520, 556]. Первый спутник программы – ENVISAT-1 – был запущен 1 марта 2002 г. Запуск второго спутника ENVISAT-2 в феврале 2003 г. оказался неудачным – аппарат не вышел на орбиту, а блоки полезной нагрузки упали в Австралии.

Орбита КА ENVISAT – солнечно-синхронная со средней высотой 799,8 км (радиус орбиты 7159,5 км), наклонение – 98,55°, орбитальная скорость – 7450 м/с, период обращения – 100,59 мин, время (местное) пересечения экватора в нисходящем узле – 10:00 ч, период повторения трасс – 35 суток. Число витков в сутки –  $14^{11/35}$ . Геометрия следа КА на поверхности Земли поддерживается с точностью 1 км относительно номинального значения. Ориентация КА в ПСК. Для повышения точности географической привязки изображений используются данные GPS, бортового высотомера, лазерных дальномерных измерений (на борту КА установлены лазерные отражатели) и автономной системы траекторно-временных измерений DORIS (точность измерения параметров орбиты около 1 м).

Начальная масса КА на орбите – 8211 кг, масса полезной нагрузки – 2145 кг. Мощность солнечных батарей – 7500 Вт (6700 Вт – через 4 года эксплуатации). Энергопотребление полезной нагрузки 1,9 кВт среднее и 3 кВт пиковое.

На борту спутника установлено 10 различных приборов, работающих в широком диапазоне волн электромагнитного спектра: от микроволновых до ультрафиолетовых.

**В состав полезной нагрузки входят:**

- РСА ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) – основное средство наблюдения;
- радиолокационный высотомер RA-2 (Radar Altimeter);
- усовершенствованный пассивный радиометр ИК- и СВЧ-диапазонов AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder);

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

- спектрометр среднего разрешения MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer);
- интерферометр Михельсона для зондирования атмосферы MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding);
- спектрометр для измерения концентрации озона в атмосфере GOMOS (Global Ozone Monitor by Occultation of Stars);
- пассивный СВЧ-радиометр MWR (Microwave Radiometer);
- сканирующий спектрометр атмосферы SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography).

Поляриметрический PCA ASAR работает в С-диапазоне волн (частота 5,331 ГГц, длина волны 5,63 см). Антенна типа АФАР имеет размеры 10×1,3 м, массу 720 кг, 4 рабочих режима. Масса PCA составляет 832 кг.

#### Основные режимы PCA следующие:

- маршрутный режим съемки с разными поляризациями MP (Image and Alternative polarization Modes);
- широкозахватный режим Скансар;
- режим глобальной съемки (PГС);
- режим съемки морских волн РМВ.

Параметры режимов PCA ASAR приведены в табл.°13.9. Реализуемое предельное разрешение в PCA в маршрутном режиме с получением комплексных РЛИ (формат SLC) определяется: по азимуту – половиной горизонтального размера антенны (5 м), а поперек трассы полета – максимальной полосой зондирующего сигнала 16 МГц (т.е. 9,375 м по наклонной дальности и 27...13 м по горизонтальной дальности при углах падения 20...45°). Предусмотрена также поставка обзорных РЛИ с разрешением 75 м в полосе съемки 100 км.

Таблица 13.9. Параметры режимов PCA ASAR

Параметр	MP	Скансар	РМВ	PГС
1	2	3	4	5
Пространственное разрешение (азимут/дальность), м	30/30	150×150	30×30	1000×1000
Радиометрическое разрешение, дБ	2,8	2	2	1,5
	3,5 (поляр.)			
Углы падения, град	20...45	17...42	20...45	17...42
Число лучей ДНА	7	5	2	5
Ширина полосы съемки, км	100...56	405	5×5 или 5×10	405
			2 кадра на площади 100×100 км <sup>2</sup>	
Ширина полосы обзора, км	500	405	485	405
Поляризация в режимах: стандартный поляриметрические	ГГ или ВВ или ГГ+ВВ или ГГ+ГВ или ВВ+ВГ	ГГ или ВВ	ГГ или ВВ	ГГ или ВВ



## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Продолжение табл. 13.9

1	2	3	4	5
Ширина спектра зондирующего сигнала, МГц	до 16 МГц			
Частота повторения, Гц	1650...2100			
Уровень неоднозначности (азимут/дальность), дБ	25 / 25 (по точечной цели)			
	22 / 15 (интегральный для дальнего луча)			
Потребляемая мощность, Вт	1365	1200	647	751
Поток цифровых данных, Мбит/с	100	~100	0,9	0,9
Время съемки за виток, мин	до 30		оставшееся на витке	

Информация передается на землю непосредственно по радиолинии X-диапазона волн, а также через спутник-ретранслятор ARTEMIS (ЕКА) по радиолинии Ka-диапазона. Используются четыре бортовых цифровых магнитофона по 30 Гбит памяти (скорость записи/воспроизведения – 4,5/50 Мбит/с). Используется один высокоскоростной канал передачи данных 100 Мбит/с, один канал – до 32 Мбит/с и 9 каналов – до 10 Мбит/с.

За время эксплуатации РСА ENVISAT/ASAR выполнено множество научных и прикладных исследований. Полученные материалы использованы для решения практических задач землепользования, экологического контроля, геологии, обеспечения инженерных и строительных работ [71, 87, 301, 369, 378, 520 и др.].

### 13.5.2. Многорежимный поляриметрический РСА C-диапазона волн Radarsat-2

Существенно расширены возможности, реализуемые РСА Radarsat-2, по сравнению с Radarsat-1 [268, 276, 330, 402]. Общий вид КА показан на рис. 13.19, зоны

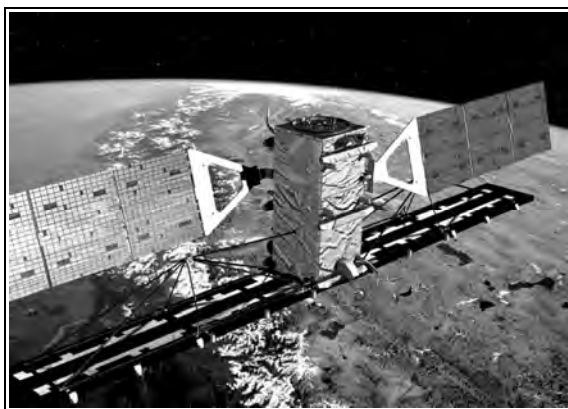
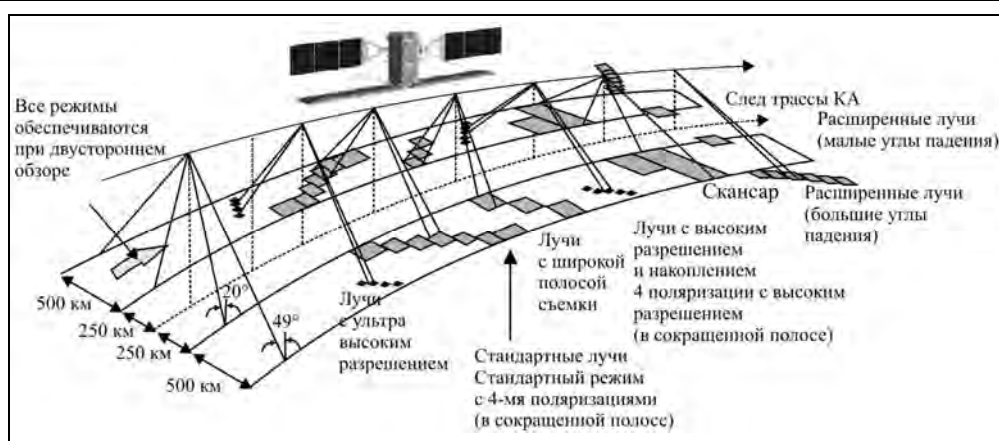


Рис. 13.19. Общий вид КА Radarsat-2

обзора РСА Radarsat-2 показаны на рис. 13.20, а параметры лучей приведены в табл. 13.10. В отличие от обычно применяемого прожекторного режима кадровой съемки с высоким разрешением в РСА Radarsat-2 используется режим «двойного приема» (см. подраздел 4.2.1) с «ультравысоким» разрешением РЛИ 3×3 м. Двойной прием реализуется путем частичного расширения ДНА на передачу (путем введения квадратичного

распределения фазы по апертуре АФАР), деления АФАР на две секции по азимуту с независимым приемом сигналов от каждой секции. Азимутальное разрешение улучшается примерно в 2 раза.

**Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...**



**Рис. 13.20.** Зоны обзора PCA Radarsat-2

**Таблица 13.10.** Параметры лучей PCA Radarsat-2

Режим	Примерные углы падения, град	Номинальная ширина полосы съемки, км	Разрешение, гор. дальн. × азимут, м	Число наблюдений дальн. × азимут
Выбор поляризации: передача Г или В, прием Г и/или В				
Высокое разрешение	37...40	50	10×9	1×1
Стандартный	20...49	100	25×28	1×4
Ближний	10...23	170	40×28	1×4
Дальний	50...60	70	20×28	1×4
Обзорный (широкий захват)	20...45	150	25×28	1×4
Узкий Скансар	20...46	300	50×50	2×2
Широкий Скансар	20...49	500	100×100	4×4
Поляриметрия: передача Г и В через период, прием Г и В в каждом периоде				
Высокое разрешение, 4 поляризации	20...41	25	11×9	1×1
Стандартный, 4 поляризации	20...41	25	25×28	1×4
Режимы одной поляризации: передача Г или В, прием Г или В				
Ультравысокое разрешение	30...40	20	3×3	1×1
Высокое разрешение, накопление	30...50	50	11×9	2×2

В PCA Radarsat-2 значительно повышается точность ориентации КА с помощью установленного астродатчика и точность позиционирования КА с помощью GPS. Бортовой накопитель емкостью 384 Гбит обеспечивает накопление данных за 28 мин на каждом витке. Масса PCA составляет 750 кг при массе КА 2280 кг.

### 13.5.3. Поляриметрический PCA L-диапазона волн PALSAR космического аппарата ALOS

Разработанный Японией (фирма JAXA) космический PCA L-диапазона PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) с АФАР является одним из основных датчиков усовершенствованного космического аппарата ALOS (Advanced Land Observing Satellite), предназначенного для ДЗЗ [72, 215, 322, 520, 534, 551]. Спутник был выведен 24 января 2006 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой 691,65 км с углом наклонения 98,16°. Время обращения составляет 99 мин, время пересечения экватора в нисходящем узле 10 ч 38 мин, период повторения трасс 46 суток.

Начальная масса КА составляет 3850 кг, мощность системы электропитания 7 кВт (после 3 лет полета). Кроме PCA на КА установлены:

1) фотоаппарат для стереосъемки PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping), позволяющий получать снимки с разрешением до 2,5 м. Фотоаппарат имеет три объектива для визирования вперед, вниз и назад, что позволяет получать цифровые карты рельефа местности (ЦКР) в полосе до 70 км;

2) мультиспектральная камера видимого и ближнего ИК-диапазона волн AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type), позволяющая получать цветные изображения Земли с разрешением 10 м.

Общий вид космического аппарата ALOS показан на рис. 13.21.



Рис. 13.21. Общий вид КА ALOS с PCA PALSAR [534]

Радиолокационный комплекс PALSAR работает в L-диапазоне волн (несущая частота 1270 МГц, длина волны 23,62 см) и является усовершенствованным вариантом станции SAR, работавшей в составе КА JERS-1. Для расширения возможностей ДЗЗ в PCA введен многоканальный поляриметрический режим съемки, при котором излучаются импульсы Г- или В-поляризации и ведется прием

двух поляризаций отраженных волн (ГГ+ГВ или ВВ+ВГ). Поляризацию излучения изменяют от импульса к импульсу, в результате реализуется полнополяриметрический режим (ГГ+ГВ+ВВ+ВГ), позволяющий получить матрицу Стокса объектов наблюдения и элементов подстилающей поверхности.

В PCA используется четырехсекционная АФАР с размерами 8,9×3,1 м, включающая 80 приемопередающих модулей. Она обеспечивает сканирование луча в угломестной плоскости (18 позиций луча в секторе углов визирования 10...51°). Это обеспечивает широкую полосу обзора (870 км) в детальном режиме и широкие полосы съемки (3-5 полос по 250...350 км) в широкозахватном режиме Скансар.

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

Масса АФАР составляет 250 кг, коэффициент усиления антенны на передачу/прием 36,5/35,8 дБ. Масса РСА равна 440 кг, энергопотребление РСА 1100 Вт.

Предусмотрены следующие *режимы работы РСА*:

- детальный маршрутный одна поляризация FBS (Fine bean single);
- детальный маршрутный две поляризации FBD (Fine beam dual);
- низкоскоростной режим прямой передачи данных (Direct downlink mode);
- широкозахватный Скансар SB;
- полнополяриметрический режим.

Параметры режимов РСА PALSAR указаны в табл.°13.11. На рис. 13.22 и 13.23 приведены образцы получаемых РЛИ. Для удобства визуального дешифрирования РЛИ, а также его регистрации в псевдоцвете поляризационные составляющие формируют в композитное RGB-изображение, например: красный – ГГ, зеленый – ГВ, синий – ВВ.

Таблица 13.11. *Параметры режимов РСА PALSAR*

Параметр	Детальный FBS	Детальный FBD	Прямая передача	Скансар SB	Полнополяриметрический
Поляризация	ГГ или ВВ	ГГ+ГВ или ВВ+ВГ	ГГ или ВВ	ГГ или ВВ	ГГ+ГВ+ВВ+ВГ
Пространственное разрешение, м	7...44	14...88	14...88	100 (много наблюдений)	24...89
Углы падения, град	8...60	8...60	8...60	18...36 18...40 18...43	8...30
Количество лучей ДНА	18	18	18	3 / 4 / 5	5
Ширина полосы съемки, км	40...70	40...70	40...70	250...350	20...65
Ширина полосы обзора, км	870	870	40...70	250...350	20...65
Чувствительность $\sigma_{не}$ , дБ	-23 – пол. съемки 70 км -25 – пол. съемки 60 км		$\leq -25$	$\leq -29$	$\leq -25$
Радиометрическое разрешение, дБ, не более	1 по кадру съемки 1,5 за виток				
Полоса зондирующего сигнала, МГц	28	14		14,28	14
Разрядность кодирования радиоголограммы	5	5	3 / 5	5	5
Скорость передачи данных на наземный сегмент, Мбит/с	240	240	120	120	240
Импульсная мощность передатчика, Вт	2000				
Уровень неоднозначности сигнала, дБ, не более	-16 – пол. съемки 70 км -21 – пол. съемки 60 км		-21	-21	-19
Формат файлов	CEOS или GeoTIFF				
Обработка информации	Радиометрическая, геометрическая коррекция, преобразование к картографическим проекциям				

**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

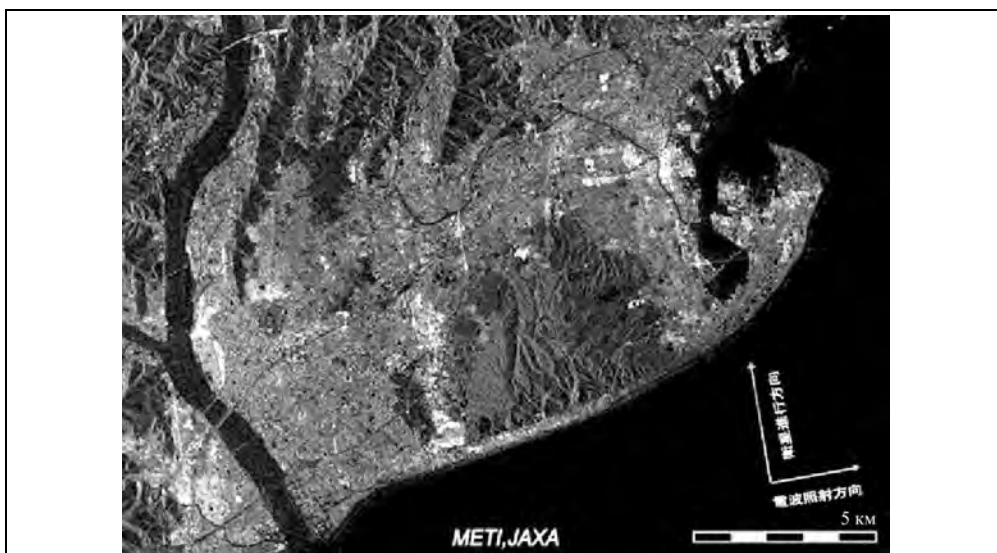


Рис. 13.22. Пример радиолокационного изображения, полученного PCA PALSAR [534]

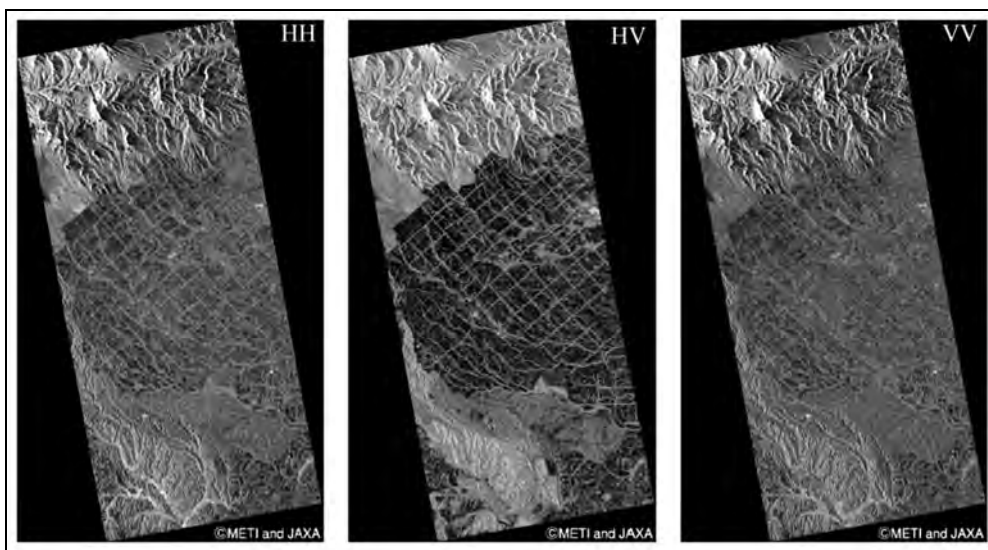


Рис. 13.23. РЛИ, полученные в полнополяриметрическом режиме: видны поля с решетчатыми лесозащитными полосами из быстрорастущих лиственных пород; расстояние между лесополосами 3 км, ширина лесополосы 180 м (PCA PALSAR, снимок 13.03.2007, угол визирования 21,5°, разрешение 30 м [574])

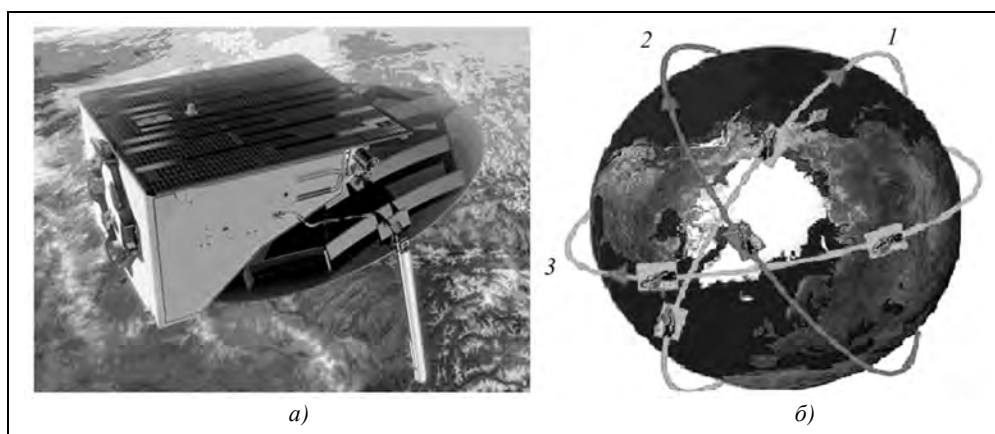
Данные, получаемые со спутника, могут быть использованы для картографирования, наблюдения за использованием природных ресурсов. Преимущественное назначение КА ALOS – применение в научных целях, коммерческое использование рассматривается как вторичная задача.

На предварительной стадии проектирования PCA PALSAR предполагалась ориентация КА в ОСК. Окончательным решением стала ориентация КА в ПСК. Режим ориентации в ОСК был оставлен как экспериментальный.

#### **13.5.4. Орбитальная группировка SAR Lure**

Орбитальная группировка космических аппаратов с PCA SAR Lure военного назначения включает в себя 5 спутников на трех околополярных орбитах высотой 470...505 км с углами наклона около  $98,7^\circ$  (рис. 13.24). Первый спутник был запущен в декабре 2006 г. и с января 2007 г. введён в эксплуатацию. Далее последовали запуски 02.07.2007 г., 01.11.2007, 27.03.2008 и 22.07.2008.

PCA работает в X-диапазоне волн и обеспечивает разрешающую способность РЛИ от 0,5 м. Основное назначение системы – видовая разведка [125, 126, 263, 568].



**Рис. 13.24.** Общий вид КА SAR Lure (а) и состав орбитальной группировки (б) [568]

Масса одного спутника составляет примерно 720 кг, его размеры –  $4 \times 3 \times 2$  м. Оцениваемое время активного существования 10 лет при доступности в течение 97 % времени в году. Средняя потребляемая мощность – 250 Вт.

По данным производителя разрешение спутника выше, чем у аналогичных американских систем Lacrosse. Кадр съемки имеет размеры  $5,5 \times 5,5$  км при «наивысшем разрешении» менее 1 м и  $60 \times 8$  км в «высоком разрешении». Ширина полосы съемки ограничивается возможностями радара, длина кадра (в маршрутном режиме) – вероятно либо методом обработки данных, либо потребляемой мощностью. Точные данные о зависимости разрешения от высоты и скорости – засекречены.

Солнечные батареи и зеркальная параболическая антенна PCA фиксировано установлены на КА. Поэтому для перенацеливания полосы съемки, а также для дозарядки буферной батареи изменяется ориентация спутника в пространстве. Изменение ориентации осуществляется при помощи магнитных катушек и маховиков. В прожекторном режиме высокого разрешения последовательность сканирующих импульсов направляется на цель с интервалом примерно 11 с. Значение используемой при этом мощности засекречено.

Наземная станция была построена с 2004 по 2006 гг. в ФРГ, в районе Гельсдорф, неподалёку от Бонна. Наземная станция состоит из двух сегментов – сегмента пользователя и сегмента управления. Первый осуществляет выбор цели и синтез изображений, второй отвечает за техническое управление и передачу изображений.

Память на спутнике ограничена 128 Гб, что позволяет получать не более 30 изображений в день (возможно, что это ограничение возникает также за счёт потребляемой энергии и ширины полосы пропускания канала связи). Для передачи данных используется радиолиния X-диапазона волн. При этом используется та же антенна, что и для РСА. Данные управления и телеметрии передаются в зашифрованном виде в S-диапазоне волн непосредственно с наземной станции или через другие спутники.

Среднее время реакции (время от запроса до передачи изображений) составляет примерно 11 ч. Правда 95 % запросов требуют для своего исполнения 19 ч. Сообщения о мероприятиях по существенному уменьшению этого времени за счёт специальных морских судов или мобильных станций управления, как это делается в США или РФ, официально не публикуются.

#### **13.5.5. Космические аппараты Cosmo SkyMed**

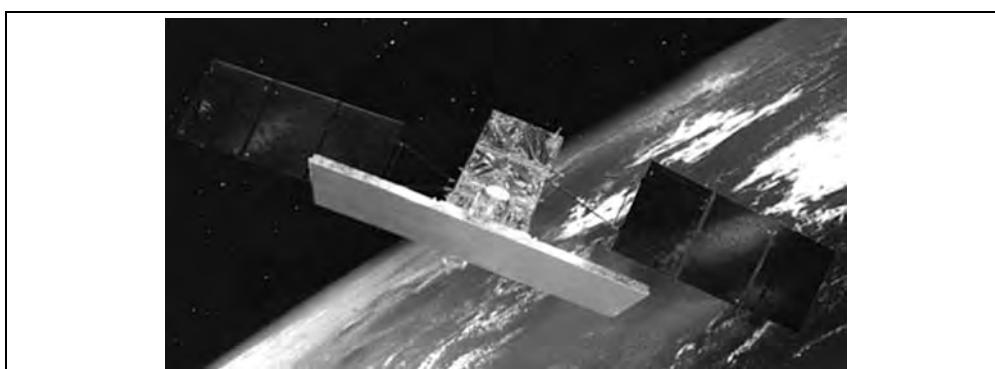
Серия космических аппаратов двойного назначения Cosmo SkyMed 1-4 (Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation – созвездие малых спутников для наблюдения за Средиземноморским бассейном) разрабатывается Итальянским Космическим Агентством (ASI) совместно с министерством обороны Италии (MoD) [53]. Области применения РСА включают мониторинг лесного покрова, сбор данных о характеристиках водной поверхности, картирование границ водоемов, экологический мониторинг, сопровождение операций по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, планирование работ по развитию дорожно-транспортной структуры, обнаружение разливов нефти и лесных пожаров, обеспечение судоходства, картирование снежного покрова, а также задачи обеспечения боевых действий в ходе военных конфликтов.

В состав орбитальной группировки входят три малых КА с оптико-электронной аппаратурой и четыре – с РСА. Первые два спутника были запущены с авиабазы Вандерберг (США) соответственно 8 июня и 8 декабря 2007 г. и выведены на солнечно-синхронную орбиту с высотой 619,6 км и наклоном 97,86°. Период обращения – 97 мин. Третий спутник Cosmo SkyMed запущен 24 октября 2008 г. Четвертый спутник планируется запустить в 2010 году. Все спутники группировки будут оснащены радиолокатором с синтезированной апертурой. Мощность электропитания 1000 Вт. Продолжительность цикла работы на витке – 1,5...10 % от длительности витка.

Общий вид КА показан на рис. 13.25. Параметры аппаратуры приведены в табл.°13.12.

РСА обеспечивает съемку земной поверхности в X-диапазоне длин волн (3,1 см, несущая частота 9,6 ГГц) с изменяемой поляризацией излучения (ГГ, ГВ, ВВ, ВГ) в диапазоне съемочных углов от 20 до 50°. РСА позволяет выполнять интерферометрическую съемку с высоким пространственным разрешением (лучше 1 м на местности).

**Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...**



**Рис. 13.25.** Общий вид КА Cosmo SkyMed [53]

**Таблица 13.12. Параметры режимов PCA Cosmo SkyMed**

Параметр	СВР	МВР	СР-СС	НР-СС	2-пол
Поляризация	С одним режимом поляризаций ГГ, ВВ, ГВ или ВГ по выбору				ГГ+ВВ, ГГ+ГВ или ВВ+ВГ
Пространственное разрешение, м	≤1	3...15	30	100	15
				(много наблюдений)	
Полоса съемки, км	Кадр 10×10	40	100	200	30
Углы падения, град	20...50				
Объем бортовой памяти, Гбит	300				
Скорость передачи данных на наземный пункт, Мбит/с	310				
Периодичность съемки, ч	10				
Разрядность кодирования радиоголограммы	8				
Напряжение источника питания, В	42				
Мощность источника питания, кВт	3,8				
Масса спутника, кг	1700				
Формат файлов	CEOS или GeoTIFF				
Обработка информации	Радиометрическая, геометрическая коррекция, преобразование к картографическим проекциям				

**Режимы работы PCA:**

- сверхвысокого разрешения (СВР), прожекторный (Spotlight) или кадровый (Frame);
- маршрутный высокого разрешения (МВР) – Stripmap или HIMAGE;
- среднего разрешения Скансар (СР-СС) – Wide Region ScanSAR;
- низкого разрешения широкозахватный Скансар (НР-СС) – Huge Region ScanSAR;
- маршрутный среднего разрешения с двойной поляризацией (2-пол) – Ping-Pong Stripmap.



## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

Предусматривается двойное назначение аппаратуры – военное и гражданское. Расчетный срок пребывания на орбите каждого аппарата Cosmo SkyMed 1-4 составляет около 5 лет.

Наземный сегмент состоит из трех станций управления и приема данных, расположенных в Италии, Испании и Греции. Эксплуатировать спутники будет итальянская компания Telespazio.

### 13.5.6. PCA TerraSAR-X

Космический PCA TerraSAR-X, разработанный фирмой DLR, Германия, выведен 10.06.2007 на солнечно-синхронную орбиту высотой 514 км (пределы 505...533 км), наклоном 95,7° [318, 340, 411, 415, 418]. Период повторения орбит 11 суток, интервал повторной съемки 2,5 сут для 95 % земной поверхности. Концепция построения PCA рассчитана на использование КА малого класса с массой 1250 кг, запускаемого ракетами-носителями «Днепр» или «Рокот».

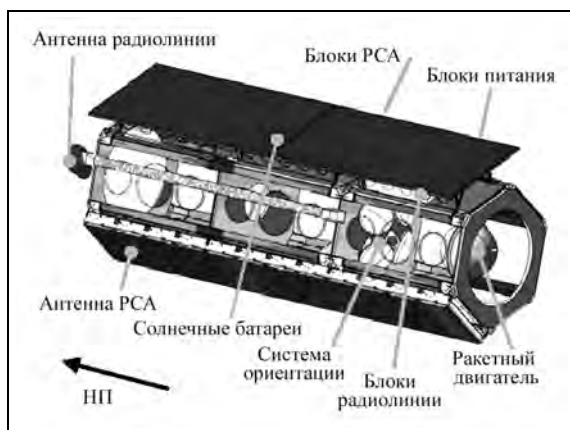


Рис. 13.26. Общий вид КА TerraSAR-X

Научный потенциал PCA базируется на возможностях аппаратуры TerraSAR-X: высокое геометрическое и радиометрическое разрешение РЛИ при полосе сигналов до 150 МГц и наличии экспериментального режима высокого разрешения с полосой сигнала 300 МГц;

режим двух поляризаций: ГГ+ВВ, ГГ+ГВ или ВВ+ВГ, получаемых одновременно;

двусторонний обзор, обеспечиваемый разворотом КА по крену;

возможность многократных наблюдений местности со сравнением РЛИ;

высокая точность орбитальных параметров КА и фазовая стабильность аппаратуры, например для межвитковой интерферометрии;

эффективность синергетической обработки РЛИ совместно с данными съемки с помощью PCA других диапазонов волн: L-диапазона (PALSAR, TerraSAR-L), C-диапазона (Envisat, Radarsat);

новые режимы работы, такие как следящий прожекторный режим, режим двойного приема, бистатические режимы пары КА TanDEM-X (с 21 июня 2010 г.);

Энергообеспечение солнечных батарей составляет в среднем за виток 800 Вт. Используемая в PCA АФАР состоит из 12 секций, включающих 384 ППМ. В PCA предусмотрено цифровое преобразование составляющих сигнала с помощью 8-разрядного АЦП с применением блочного адаптивного квантования ВАК на выходе до 4-, 3- и 2-х разрядов.

Общий вид КА приведен на рис. 13.26. Параметры PCA TerraSAR-X приведены в табл.°13.13.

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

гибкое управление АФАР, режимами работы и параметрами сигналов с их адаптацией к пользовательским задачам;

маркетинговая деятельность, направленная на коммерческое использование получаемых снимков, а том числе организация сетевого доступа к изображениям с калибровочными параметрами. Предусмотрено использовать получаемые с помощью TerraSAR-X данные в Международной программе глобального мониторинга окружающей среды и безопасности (GMES).

Таблица 13.13. Параметры PCA TerraSAR-X

Параметры режимов работы	Прожекторные		Маршрутный	Скансар
	ПР1	ПР2		
Центральная частота, ГГц	9,65			
Тип, размеры антенны, м	АФАР 4,8×0,7×0,15 (азим. × угол места × толщ.)			
Число фазовых центров	12×32 (азим. × угол места)			
Углы сканирования, град	±0,75×±20 (азим. × угол места)			
Углы падения, град	20...55	20...55	20...45	20...45
Полоса обзора, км	570	570	350	350
Полоса съемки, км	15	15	30	100
Протяженность маршрута (кадра), км	5	10	не ограничена	не ограничена
Разрешение, м				
азимут	1	2	3	15
наклонная дальность	1,2	1,2	–	–
горизонтальная дальность	–	–	3	16
Число наблюдений	1	1	1	4
Чувствительность NESZ, дБ	–(19,6...28,9)	–(19,6...30)	–(18,9...26,5)	–(18,8...29,6)
Интегральный уровень неоднозначности, дБ	–(16,6...25,5)	–(18...27,5)	–(19,0...25,4)	–(19,8...29,6)
Шумфактор на входе ППМ, дБ	5			
Частота повторения, Гц	3000...6500			
Полоса спектра сигнала, МГц	5...300			
Частота квантования, МГц	110, 165, 330			
Скважность приема, %	100, 67, 33			
Сжатие сигнала ВАQ (по выбору)	8, 4, 3, 2, без ВАQ			
Объем памяти, Гбит	320 / 256 (в конце срока службы)			
Скорость формирования данных (8/4 ВАQ), Мбит/с	680	340	580	580
Скорость передачи данных по радиолинии, Мбит/с	300			
Расширенные режимы без гарантии качества РЛИ				
Углы падения, град	15...60	15...60	15...60	20...60
Полоса обзора, км	622	622	622	577
Излучаемая пиковая мощность, Вт	2260			
Скважность работы на витке, %:				
маршрутный режим	18			
прожекторный режим	20			

Кроме обычно применяемого прожекторного режима кадровой съемки с высоким разрешением в РСА TerraSAR-X используется режим двойного приема с разрешением РЛИ  $(1...2) \times 1,2$  м. Двойной прием (см. подраздел 4.2.1) реализуется путем частичного расширения ДНА на передачу (введением квадратичного распределения фазы по апертуре АФАР), разделения АФАР на две секции по азимуту с независимым приемом сигналов от каждой секции. Разрешение по азимуту улучшается примерно в два раза («ультравысокое» разрешение). Точность управления лучом антенны составляет 65 угл. с ( $3\sigma$ ). Погрешность привязки РЛИ к координатам по GPS не более 3 м ( $3\sigma$ ).

Генератор зондирующих сигналов с цифровым управлением формирует четыре типа импульсов с задаваемой длительностью и шириной спектра до 150 МГц. Из хранимых в памяти четырех образцов сигнала может излучаться любой, чередуясь от периода к периоду. Сигнал с полосой 300 МГц для экспериментального режима формируется аналоговым методом.

В приемном устройстве используются сосредоточенные фильтры для исключения наложения сигналов, согласованные с частотами квантования в АЦП 110, 165 и 330 МГц и разрядностью 8 бит. После запоминания строки данных производится компрессия ВАQ по блокам 128 отсчетов с выбранной разрядностью компрессии (4, 3 или 2 разряда). На КА дополнительно установлен экспериментальный лазерный канал передачи данных спутник-спутник.

21 июня 2010 г. запущен второй КА с РСА в режиме тандема TanDem-X.

### **13.5.7. РСА TECSAR**

Интересная концепция заложена в израильский РСА TECSAR [385, 422], выведенный 21.01.2008 на орбиту высотой 580 км с углом наклона 41°. Период обращения равен ~90 мин. Аппарат имеет малый вес 295 кг при полезной нагрузке 100 кг и мощности солнечных батарей 750 Вт. Это обеспечивает сочетание электронного сканирования лучом ДНА с механическим разворотом КА по крену для двустороннего обзора и по азимуту для реализации прожекторного режима. Низкая ожидаемая цена КА с РСА облегчает создание орбитальной группировки для сокращения периодичности съемки. Бортовая аппаратура включает в себя: блок формирования сигналов и управления, многоламповый передатчик, разворачиваемую на орбите зеркальную антенну с сетчатым рефлектором, бортовое запоминающее устройство, радиолинию передачи данных. Общий вид КА с РСА представлен на рис. 13.27.

*Основные режимы работы* включают в себя (конкретные параметры режимов в статье [422] не приводятся):

- режим Скансар (СС) с электронным управлением луча для обеспечения широкой полосы съемки;
- различные маршрутные режимы (МР);
- различные прожекторные режимы (ПР), использующие механический разворот КА по курсу;
- режимы с некогерентным накоплением наблюдений;
- поляриметрические режимы ВВ, ВГ, ГГ, ГВ;

- различные режимы «Мозаики», сочетающие высокое разрешение изображений с обзором в широком диапазоне углов падения, реализуемым электронным сканированием луча и механическим разворотом КА.

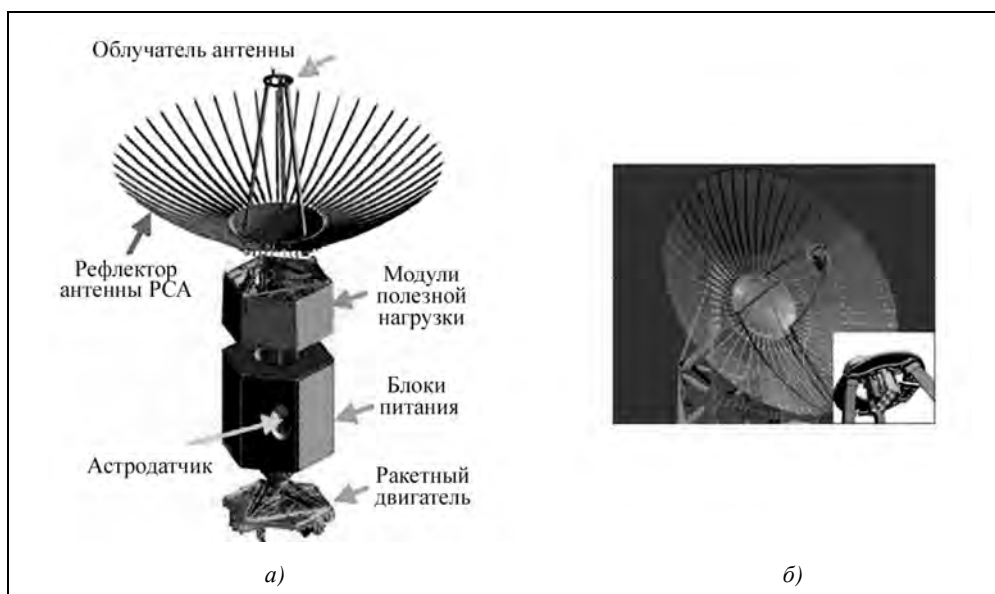


Рис. 13.27. Общий вид КА с PCA TecSAR (а) и конструкция облучателя антенны (б)

Возможность работы в этих режимах обеспечивается гибким управлением зондирующих сигналов (полосы частот, длительности импульсов, частоты повторения). Выбор орбиты обеспечивает малую периодичность съемки и возможность межвитковой интерферометрии. Работа в поляриметрическом режиме обеспечивается путем замены фидеров, запитывающих облучатель, и применением двух приемных каналов.

При общей массе PCA 100 кг обеспечивается резервирование всех электронных блоков. Оригинально построение антенны и передатчиков. Антенна с параболическим рефлектором имеет очень широкую полосу благодаря использованию элементов временной задержки при электронном сканировании. Антенна PCA TECSAR имеет большую эффективную площадь, что обеспечивает повышение потенциала при высоком разрешении РЛИ по дальности. Отражатель антенны включает в себя две секции – центральную тарелку и периферический параболический сетчатый рефлектор. Каждый фидер, соединяющий передатчики с облучателями, смещен по отношению к оси рефлектора, что позволяет формировать многолучевую ДНА в пространстве.

### 13.5.8. Индийский PCA RISAT-1

Проект индийского PCA RISAT-1 [405, 407] является примером «классического» построения поляриметрического PCA С-диапазона волн: применение АФАР размером  $6 \times 2 \text{ м}^2$ , состоящей из трех панелей размером  $2 \times 2 \text{ м}^2$ . Всего АФАР включает 575 приемопередающих модулей (ППМ) со средней мощностью 400 Вт. Каждый



**Рис. 13.28.** Общий вид КА с PCA RISAT-1  
вид КА с PCA RISAT-1, панелями АФАР и ППМ приведены на рис. 13.28.

ППМ имеет два приемных канала, подключенные к двум распределительным системам, что обеспечивает работу с двумя поляризациями ВВГ или ГГВ при разрешении РЛИ  $3 \times 3 \text{ м}^2$ . Режим четырех поляризаций с разрешением  $12 \times 12 \text{ м}^2$  реализуется чередованием кадров ВВГ- и ГГВ-поляризаций, как в режиме Скансар. Масса PCA составляет 950 кг при массе КА 1250 кг. Общий

Для двустороннего обзора КА разворачивается по крену на  $\pm 34^\circ$ . В прожекторном режиме предусматривается механический разворот КА на  $\pm 13^\circ$  по тангажу. Компенсация вращения Земли обеспечивается разворотом КА по курсу в путевую систему координат.

Используются зондирующие сигналы с полосой 18,75, 37, 5 и 75 МГц, а также с полосой 225 МГц. Полоса 225 МГц обеспечивает получение РЛИ с разрешением 1...2 м.

На борту предусматривается использование 8-разрядного АЦП с передачей информации в прожекторном режиме в 3-разрядном формате и 6-разрядном – в остальных режимах с применением сжатия динамического диапазона сигналов путем блочного адаптивного квантования (BAQ). Емкость бортового накопителя 240 Гбит. Максимальная скорость передачи данных на Землю 1478 Мбит/с для двух поляризационных составляющих.

Предусматривается 100-процентное резервирование подсистем PCA. Особые меры применяются для калибровки передающих и приемных каналов каждого из ППМ с использованием специальных переключателей и распределительных цепей.

Запуск КА RISAT-1 был запланирован на 2007 г., но отложен из-за сложностей реализации заложенных в аппаратуру технических решений. Для обеспечения страны радиолокационной информацией Индия приобрела у Израиля комплект PCA TECSAR, осуществив его запуск под обозначением RISAT-2. Следующей разработкой индийской фирмы ISRO должен быть PCA *L*-диапазона волн [294].

### **13.5.9. Перспективный PCA TerraSAR-L**

Проект PCA *L*-диапазона волн TerraSAR-L [488] имеет целью расширение возможностей дистанционного зондирования Земли, особенно для задач мониторинга растительного покрова, ледовых образований, а также значительного повышения точности измерения рельефа местности. Отмечается, что при наблюдении растительности взаимная когерентность интерферометрических изображений в *L*-диапазоне волн (около 90 %) существенно выше, чем в *C*-диапазоне волн (около 15 %). Особую роль имеет применение системы орбитальных измерений GNSS, обеспечивающей прецизионную точность знания орбиты до 5 см в пределах трубки 100 м. В этом смысле TerraSAR-L весьма пригоден для мониторинга сейсмических явлений и вулканической деятельности. В *L*-диапазоне волн возможна оценка объема био-

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

массы лесных массивов от 50 т/га в отличие от *C*- и *X*-диапазонов, в которых сигнал от интенсивной растительности попадает в область ограничения. Также более пригоден *L*-диапазон для наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн и вихревых образований на морской поверхности. Вместе с тем, необходим более высокий энергетический потенциал РСА, компенсирующий снижение отражающей способности местности (в 4 раза по сравнению с *C*-диапазоном волн). Для его обеспечения используются солнечные батареи со средней мощностью 5 кВт.

Предусматривается специальная обработка двух частотных поляриметрических полос, разделенных на 70 МГц, для измерения ионосферных искажений и вращения плоскости поляризации, вызванной эффектом Фарадея.

Для сокращения объема передаваемых данных, устранения перегрузки применяются современные методы кодирования выходных данных. Бортовой накопитель рассчитан на 600 Гбит информации, которая после криптографического кодирования передается по радиолинии на землю со скоростью 300 Мбит/с. Параметры РСА TerraSAR-L приведены в табл. 13.8.

Общий вид КА с РСА TerraSAR-L приведен на рис. 13.29. Масса КА составляет 2800 кг. Компоновка РСА на ракете носителе показана на рис. 13.30. Антенна РСА типа АФАР с размерами 11×2,9 м состоит из двух складывающихся секций и включает 160 ППМ.

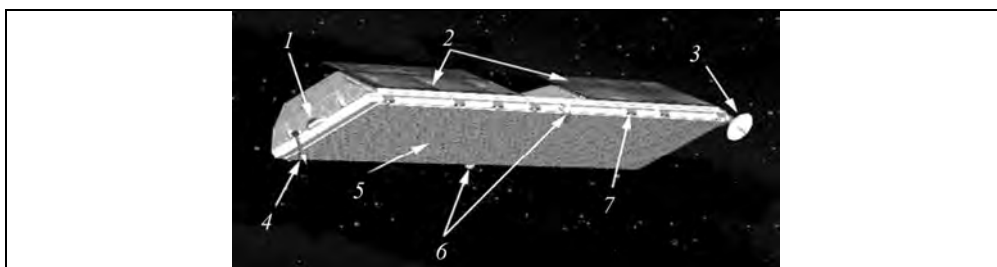


Рис. 13.29. Общий вид КА с РСА TerraSAR-L:

1 – двигатель системы ориентации; 2 – солнечные батареи; 3 – линия передачи данных *X*-диапазона; 4 – антенна аппаратуры слежения; телеметрии и управления; 5 – антенна РСА *L*-диапазона; 6 – поворотные петли; 7 – механизм складывания

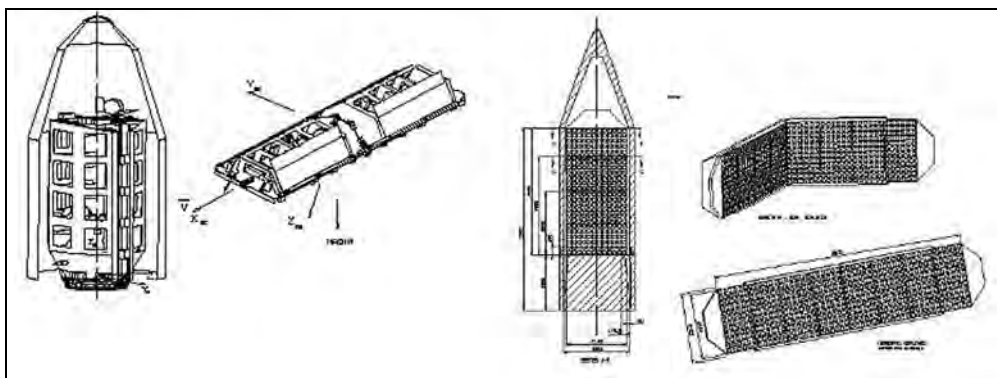


Рис. 13.30. Компоновка РСА TerraSAR-L на ракете-носителе

### 13.5.10. Радиолокатор «Северянин-М» КА «Метеор-М» №1 космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения

Бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК) «Северянин-М» входит в состав КА «Метеор-М» №1 космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» [102, 124]. КА «Метеор-М» №1 (разработчик ФГУП «НПП ВНИИЭМ») был запущен 17 сентября 2009 г. на близкую к круговой солнечно-синхронную орбиту высотой 832 км с наклоном 98,786°. Масса КА составляет 2630 кг, масса полезной нагрузки 1200 кг, энергообеспечение от солнечной батареи 4,5 кВт (4 кВт – в конце срока службы 5 лет), емкость аккумуляторных батарей 2×90 А·ч, среднесуточная мощность потребителей 1430 Вт. КА имеет трехосную электромеханическую систему ориентации с угловыми погрешностями 10 угл. мин, угловая скорость в режиме стабилизации не превышает 0,005 град/с.

Радиолокатор «Северянин-М» (разработчик ФГУП НИИТП) использует принцип искусственной апертуры антенны за время излучения одного импульса длительностью до 5,5 мс (длина апертуры ~40 м).

#### *Режимы работы радиолокатора:*

- дежурный режим прогрева клистрона – выходного усилителя мощности. Из-за ограниченного числа включений клистрона этот режим используется в паузах между съемками;
- режим съемки со средним разрешением;
- режим съемки с низким разрешением;
- режим калибровки сквозного тракта;
- режим смены констант.

Общий вид КА «Метеор-М» показан на рис. 13.31, расчетные характеристики радиолокатора «Северянин-М» приведены в табл.°13.14.



Рис. 13.31. Общий вид КА серии «Метеор-М» №1 с БРЛК «Северянин-М»

**Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...**

**Таблица 13.14. Характеристики режимов радиолокатора «Северянин-М»**

Характеристика	Значение	
Высота орбиты КА, км	832	
Наклонение орбиты	Определяется Заказчиком	
Длина волны РСА, см	3,12 (X-диапазон)	
Тип и размеры антенны	Волноводно-щелевая, 13,4×0,25 м <sup>2</sup>	
Направление обзора	Вправо от трассы КА	
Углы падения, град	20...48	
Полоса съемки, км	600	
Параметры режимов обзора	Режимы обзора	
	среднее разрешение	низкое разрешение
Разрешение, м	450...600	800...1300
Поляризация	ВВ	ВВ
Длина маршрута, км	8...10	до 500
Число наблюдений	12 (выигрыш по отношению с/ш 5 дБ)	
Чувствительность $\sigma_{не}^0$ , дБ	-20	
Радиометрическое разрешение, дБ	1,9	1,51
Точность калибровки сквозного тракта, дБ	1	
Динамический диапазон измеряемых УЭПР, дБ	от -25 до +3	
Излучаемая мощность, Вт:	импульсная	1000
	средняя	117
Скорость потока информации, Мбит/с, не более	10	
Масса БРЛК, кг	150	
Энергопотребление, Вт	1000	
Циклограмма работы БРЛК	Односеансное включение на витке до 10 мин	

Антенна радиолокатора складная, 7 секций из алюминиевых волноводов сечением 23×10 мм<sup>2</sup>. Форма ДНА по углу места – косекансная 22,5° с перепадом усиления 5,6 дБ, коэффициент усиления – не менее 7000. Масса антенного устройства – не более 35 кг.

Основное назначение БРЛК «Северянин-М» – решение задач оперативной гидрометеорологии, ледовая разведка, определение границ ледового и снежного покровов, оценка водного эквивалента, исследования крупномасштабных геологических структур, зон экологического загрязнения и др.

**13.5.11. РСА малого космического аппарата «Кондор-Э»**

При проектировании РСА для малого космического аппарата (МКА) «Кондор-Э», в ОАО «Концерн «Вега» решалась задача создания универсальной многорежимной аппаратуры, позволяющей решать широкий круг пользовательских задач, включая мониторинг земных покровов, обеспечение судовождения, контроль оперативной обстановки в зонах конфликтов [45\*, 215, 223\*, 440\*]. Масса аппаратуры для размещения ее на МКА не должна превышать 250 кг при полной массе МКА 850 кг.

Концепция РСА была сформулирована по результатам анализа информативности различных диапазонов волн для решения задач дистанционного зондирова-



### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

ния Земли и возможностей аппаратурной реализации. Был сделан вывод, что для совмещения задач детального наблюдения заданных районов и дистанционного зондирования Земли оптимальна S-диапазон волн с полным использованием выделенной полосы частот и реализацией широкого набора режимов работы. Предусмотрены детальные маршрутный и прожекторные режимы с разрешением от 1 м, обзорные режимы пониженного разрешения (Скансар).

Для решения всего спектра пользовательских задач в РСА реализован полный набор **режимов работы**:

- прожекторный режим (ПР) максимального разрешения;
- маршрутные детальный (ДР);
- обзорный (ОР);
- широкозахватный Скансар (СС) низкого разрешения.

Основные характеристики РСА приведены в табл.°13.15, а на рис. 13.32 приведена функциональная схема РСА.

**Таблица 13.15. Характеристики режимов РСА малого космического аппарата «Кондор-Э»**

Характеристика	Значение			
Высота орбиты КА, км	500			
Наклонение орбиты	Определяется Заказчиком			
Длина волны РСА, см	9,4 (S-диапазон)			
Направление обзора	Вправо/влево от трассы			
Углы падения, град	20...60			
Полоса обзора, км	2×450			
Параметры режимов обзора	Режимы обзора			
	ПР	ДР	ОР	СС
Полоса съемки, км	8...10	10...25	20...40	120
Разрешение, м:				
по азимуту	1...2	2,5...3	5...10	30
по дальности	1...2	1,5...2,5	5...10	30
Поляризация	ГГ	ГГ, ВВ	ВВ	ВВ
Длина маршрута, км	8...10	до 500	до 500	> 500
Число наблюдений	2...4	1	2...4	4...5
Чувствительность $\sigma_{не}^0$ , дБ	-20	-15	-20	-20

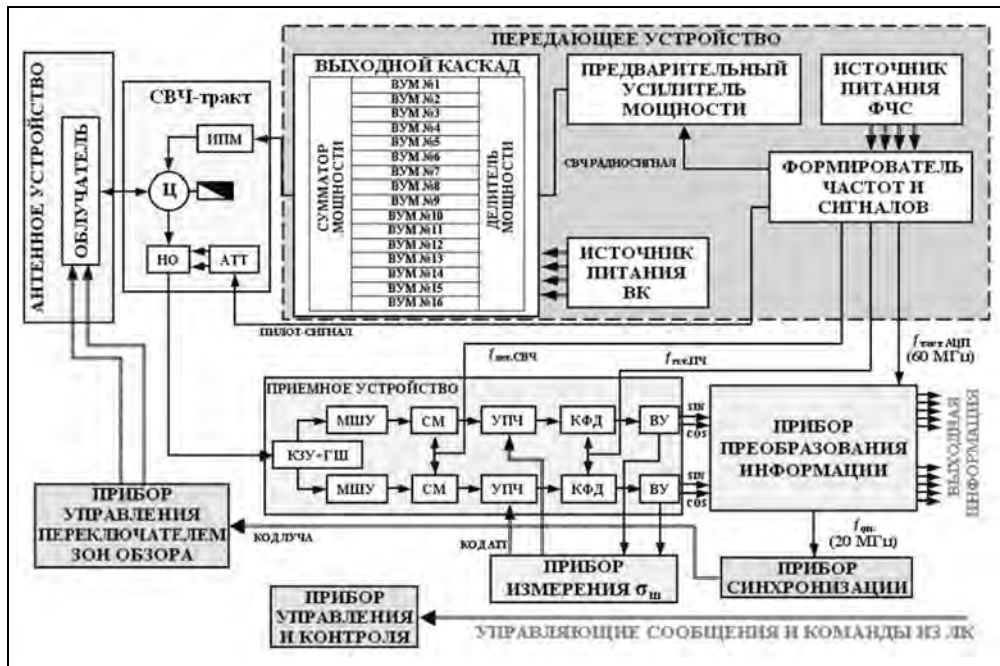
В состав РСА входят: передающее устройство с формирователем частот и сигналов, СВЧ-тракт, антенное устройство, прибор управления переключателем зон обзора, приемное устройство, прибор преобразования информации, приборы синхронизации, управления и контроля, а также прибор для измерения шумов  $\sigma_n$  для калибровки приемного устройства.

В составе СВЧ-тракта имеется измеритель проходящей мощности (ИПМ) и циркулятор (Ц), выполняющий функции переключателя прием-передача. На вход

**Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...**

приемного устройства через аттенюатор (АТТ) и направленный ответвитель (НО) вводится ослабленный пилот-сигнал от формирователя частот и сигналов. Он служит для калибровки сквозного приемного тракта.

Приемное устройство включает два идентичных приемных канала – основной и резервный. Они переключаются коммутационно-защитным устройством КЗУ, на входе которого включен генератор шума ГШ для измерения шумфактора приемных каналов. В состав каждого из них входят малошумящий усилитель МШУ, смеситель СМ, усилитель промежуточной частоты УПЧ с регулируемыми цифровыми аттенюаторами для поддержания стабильного уровня сигнала на выходе, каналы фазовых детекторов КФД, формирующих ортогональные составляющие на видеочастоте и видеоусилители ВУ, сигналы с выходов которых поступают на аналого-цифровые преобразователи в приборе преобразования информации. В нем к радиолокационным сигналам радиоголограммы добавляется служебная информация о режиме работы РСА и параметрах сигнала. Управление аттенюаторами в УПЧ обеспечивается с помощью прибора измерения шумов  $\sigma_{ш}$  (среднего уровня видеосигнала).

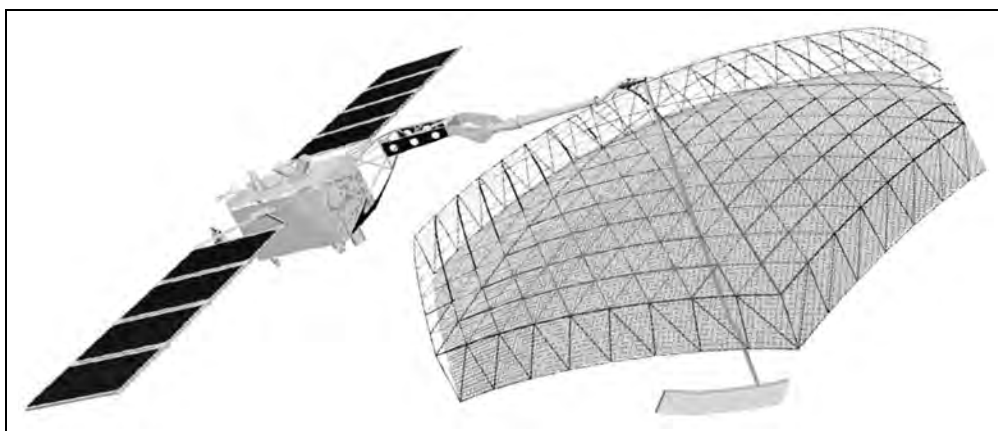


**Рис. 13.32.** Функциональная схема РСА КА «Кондор-Э»

Одна из важнейших задач – оперативность наблюдения, достигаемая сокращением времени повторной съемки, требует максимального расширения полосы обзора, т.е. увеличения углов падения, ограниченных условиями неоднозначности по азимуту/дальности. Эта задача облегчается применением в РСА гибридной зеркальной антенны диаметром рефлектора около 6 м с большой эффективной площадью

### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

дью – около  $28 \text{ м}^2$ . Антенна имеет рефлектор ферменной конструкции, раскрывающийся в космосе, разработанный на основе антенны РСА, установленной на модуле «Природа» космической станции МИР. Масса одного квадратного метра таких рефлекторов составляет около 0,7 кг. Электронное сканирование лучом, необходимое для реализации прожекторного режима, обеспечивается 32-рупорным облучателем, образующим решетку по 8 излучателей с управляемым шагом в фокальной плоскости рефлектора (см. подраздел 12.2.4). В результате формируются 25 парциальных лучей с отклонением  $\pm 2^\circ$ . Общий вид космического аппарата с раскрытой антенной показан на рис. 13.33.



**Рис. 13.33.** Общий вид космического аппарата «Кондор-Э» с раскрытой антенной РСА

Для режима Скансар облучатель антенны механически разворачивается в вертикальное положение и реализуется электронное сканирование луча по углу места. Одновременно меняется поляризация сигналов на излучение и прием (с ГГ на ВВ). Подвижной узел крепления антенны позволяет расширить пределы перенацеливания полосы съемки, а также изменять направление обзора вправо и влево относительно трассы полета.

Использование в передатчике (рис. 13.34) сосредоточенного транзисторного усилителя с суммированием мощности и средней мощностью излучения 200 Вт позволяет обеспечить высокую надежность в течение срока службы не менее 5 лет. Используемый выходной сумматор мощности на 16 модулей имеет потери не более 0,5 дБ.

Цифровой формирователь зондирующих сигналов с ЛЧМ обеспечивает широкие возможности для изменения параметров излучаемых импульсов. В РСА применены современные методы уменьшения помех, вызванных неоднозначностью сигналов по дальности и азимуту. С этой целью предусмотрены наборы зондирующих сигналов с разной начальной фазой и направлением ЛЧМ. Предусмотрены также специальные сигналы и режимы для текущего контроля приемопередающего тракта и калибровки РСА.

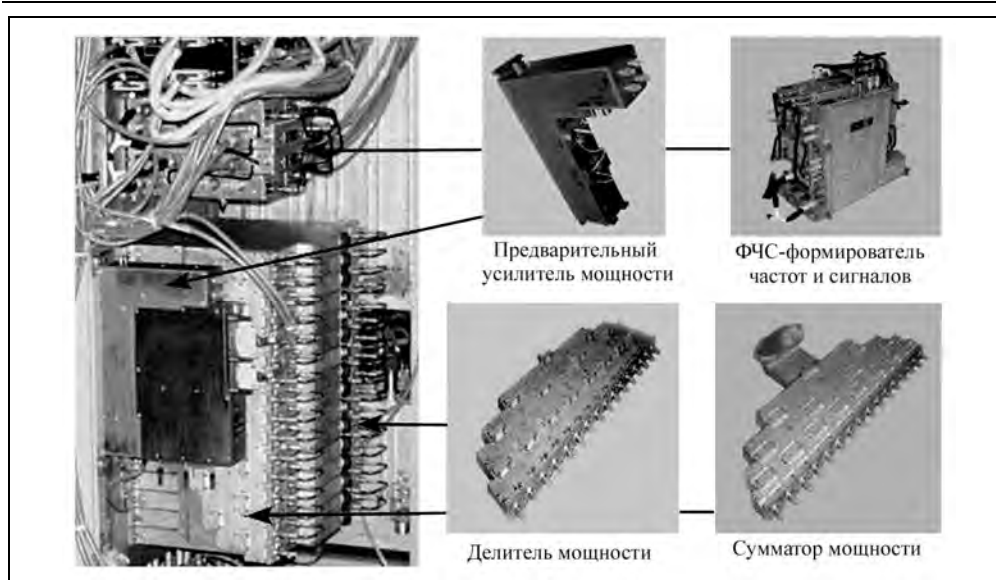


Рис. 13.34. Передающее устройство РСА

Резервированное приемное устройство имеет коэффициент шума менее 2 дБ и динамический диапазон ~40 дБ. Переключение каналов обеспечивается СВЧ-переключателем с потерями не более 0,2 дБ. Защита МШУ обеспечивается оригинальным безынерционным циклотронным защитным устройством с потерями ~0,15 дБ. В усилителях промежуточной частоты приемников установлены цифровые аттенюаторы с затуханием 1, 2, 4, 8, 16 дБ, управление которыми обеспечивается либо программно, либо от системы цифровой АРУ (прибор измерения  $\sigma_{ш}$ ) по среднему уровню принимаемого от местности сигнала.

Для исключения перегрузок приемника при сильных сигналах в УПЧ установлены безынерционные ограничители. Фазовые сдвиги сигналов при работе цифрового АРУ и ограничителя не превышают  $10^\circ$  на каждые 10 дБ сжатия динамического диапазона. Наличие компрессии сигналов в приемнике позволяет использовать в приборе преобразования информации 4-разрядный АЦП.

Цифровое управление аппаратурой РСА, режимами работы и параметрами зондирующего сигнала обеспечивает гибкое использование ресурсов космического аппарата для удовлетворения различных потребителей радиолокационной информации.

Для калибровки РСА предусмотрены устройства измерения мощности передатчика, коэффициента шума приемника, пилот-сигнал для сквозного тестирования, а также другие средства.

Конструктивное выполнение аппаратуры рассчитано на работу в негерметичном отсеке. Охлаждение обеспечивается тепловыми трубками, отводящими тепло на теплообменник космического аппарата. Вид аппаратуры на технологической раме, конструкция модуля мощного усилителя, синхронизатора и АЦП показаны на рис. 13.35. Технические и эксплуатационные параметры РСА приведены в табл. 13.16.

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

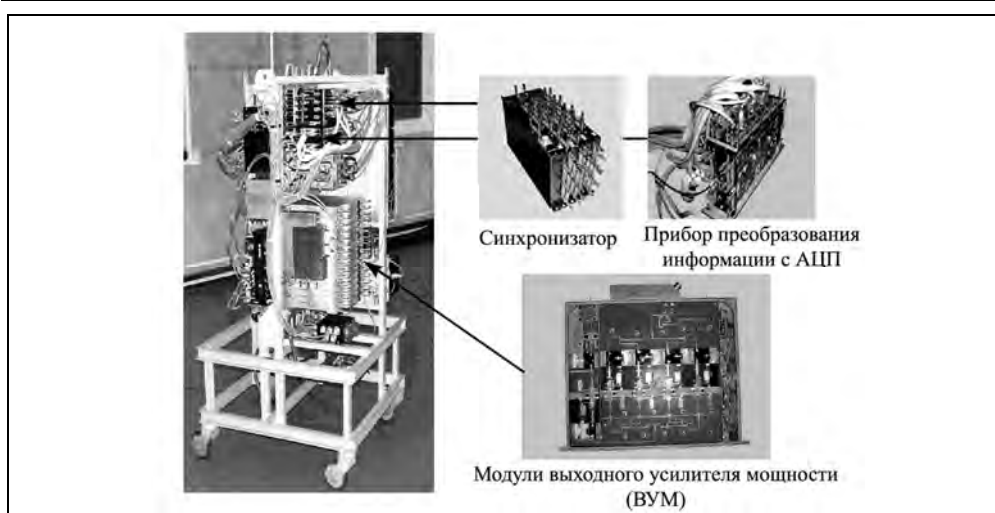


Рис. 13.35. Вид аппаратуры на технологической раме

**Таблица 13.16. Технические и эксплуатационные параметры РСА**

Параметры		Значение
Антенна:	диаметр	6 м
	масса	95 кг
РСА	масса	150 кг
Масса	суммарно	250 кг
Энергопотребление		не более 1700 Вт
Ресурс		до 5 лет

Разрабатываемый для космического аппарата «Кондор-Э» радиолокатор с синтетизированной апертурой антенны является высокоинформативным средством дистанционного зондирования Земли с возможностью измерения отражающих характеристик объектов и земной поверхности в *S*-диапазоне волн. Аппаратура может быть легко адаптирована для установки на космическом аппарате другого типа.

### 13.5.12. Проект двухчастотного РЛК для мониторинга объектов топливно-энергетического комплекса «Смотр-SP»

Технические решения, основанные на разработках ОАО «Концерн «Вега» для малого КА «Кондор-Э» с РСА *S*-диапазона волн и бортового радиолокационного комплекса (БРЛК) «Спинар-1ДМ» с РСА *L*- и *P*-диапазонов, находят развитие в проекте двухчастотного космического БРЛК для системы регионального землеобзора и мониторинга объектов и территорий «Смотр-SP», который предназначен для решения следующих задач [45\*, 64, 223\*]:

- 1) топографическое и геологическое цифровое картографирование Земли в интересах разведки полезных ископаемых, исследования природных ресурсов, включая шельфовые зоны;
- 2) геоинформационное обеспечение землепользования и создания инфраструктуры объектов;

### Глава 13. Космическая аппаратура радиолокационного наблюдения ...

3) экологический мониторинг наземных и морских нефтеразработок, терминалов, подводных продуктопроводов. Обнаружение разлива нефти на суше и водной поверхности;

4) мониторинг растительного покрова в интересах сельского и лесного хозяйства;

5) мониторинг динамики ледовых образований (ледовых полей, ледников), оценка водозапаса;

6) круглогодичный и круглосуточный высокоточный (единицы сантиметров) автоматизированный контроль геометрии трасс продуктопроводов, сетей ЛЭП и других инженерных сооружений, в том числе заглубленных;

7) прогноз воздействия природных факторов и катастрофических явлений (оползней, подтоплений, землетрясений и др.) на состояние инженерных объектов;

8) мониторинг несанкционированного доступа к удаленным объектам ТЭК;

9) оперативный контроль морских танкерных и других перевозок, в том числе по Севморпути;

10) оперативное информационное обеспечение при авариях и чрезвычайных ситуациях.

В БРЛК «Смотр-SP» предусматривается использование гибридной зеркальной антенны (АФАР-ГЗА) с рефлектором, имеющим расчетные размеры  $10 \times 5$  м, и совмещенным двухчастотным АФАР-облучателем, который поперек трассы полета имеет размер 2,1 м для формирования сканирующей ДНА по углу места. Вдоль трассы полета (по азимуту) общие размеры облучателя ГЗА составляют 1,2 м при ширине АФАР для РСА-S, равной 0,25 м, и для РСА-P – 1,2 м. Вид космического аппарата с антенным устройством БРЛК «Смотр-SP» показан на рис. 13.36.

Благодаря использованию АФАР-ГЗА упрощается реализация поляриметрических режимов в РСА, возможно гибкое управление лучами (в РСА-S) и расширение номенклатуры рабочих режимов. В частности, вместо широкозахватного режима Скансар, в котором расширение полосы съемки достигается за счет ухудшения разрешения по азимуту, можно ввести маршрутный многолучевой режим (ММЛР) с реализацией азимутального разрешения ( $5 \dots 10$  м) в широкой полосе съемки.

В режиме ММЛР предусматривается излучение пачки зондирующих импульсов на разных поднесущих, смещенных на ширину спектра излучения (с 30-процентным запасом) и подключаемых к разным кластерам облучения на АФАР с тем, чтобы перекрыть необходимый угол сканирования. Число парциальных лучей до 10 при ширине луча от  $1,5^\circ$  на максимальном отклонении от оси рефлектора до  $4 \dots 5^\circ$  вблизи оси. Прием и усиление сигналов (одной поляризации) производят в независимых приемных каналах, подключенных к секциям АФАР-облучателя (используют поляриметрические и резервные каналы), а

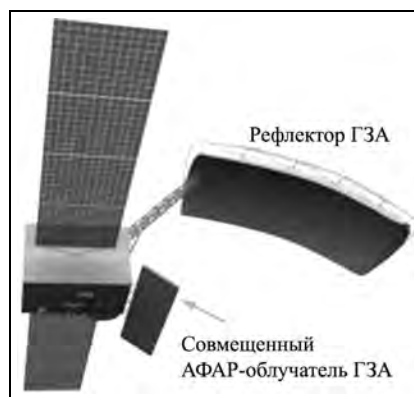


Рис. 13.36. Общий вид КА с БРЛК «Смотр-SP» с раскрытой антенной РСА

### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

окончательное разделение сигналов обеспечивают путем их цифровой фильтрации перед синтезом РЛИ.

В **РСА-S** предусматриваются следующие **режимы работы**:

- детальный прожекторный режим (ПР), осуществляемый сканированием луча по азимуту (возможно, с использованием поворота КА по курсу на  $90^\circ$ );
- маршрутный режим (МР);
- поляриметрические режимы (Пол);
- обзорный широкозахватный режим ММЛР.

В **РСА-P** применяют маршрутный режим (МР) с перенацеливанием луча в пределах  $\pm 5^\circ$  для выбора положения полосы съемки. Ориентировочные технические и эксплуатационные параметры БРЛК «Смотр-SP» приведены в табл. 13.17. Они подлежат уточнению применительно к размещению на конкретном КА.

**Таблица. 13.17. Характеристики БРЛК «Смотр-SP»**

Параметры	РСА-S, режимы работы				РСА-P
	ПР	МР	Пол	ММЛР	МР
Высота орбиты КА, км	500				
Наклонение орбиты	Определяется Заказчиком				
Длина волны РСА, см	9,4				69
Направление обзора	Вправо/влево от трассы				
Полоса обзора, км	2×500				2×250
Полоса съемки, км	5	10...40	10...60	500	60...120
Разрешение, м:					
по азимуту	1	5	5...10	10	15...30
по дальности	1...1,5	5	5...10	10	15...30
Поляризация	ВВ/ГГ/ВГ/ГВ	ВВ/ГГ/ВГ/ГВ	ВВ+ГГ+ +ВГ+ГВ	ГГ/ВВ/ГВ/ВГ	ВВ+ГГ+ +ВГ+ГВ
Длина маршрута, км	10 (кадр)	до 500	до 500	до 2000	до 500
Число наблюдений	1...4	1...3	$\geq 2$	2	4...6
Чувствительность $\sigma_{\text{пс}}^U$ , дБ	-22	-17	-22	-22	-24
Полоса сигнала, МГц	200	50...100	50	15×(5...10) по числу лучей	6...13
Ширина ДНА, град:					
по азимуту	~1	~1	~1	~1	~5
по углу места	~0,5	~0,5	1	1...5	~5
Масса аппаратуры, кг,	150				95
суммарно, включая ан-	340				
Энергопотребление, Вт,	1700				520
суммарно	2220				

Реализация такого двухчастотного радиолокационного комплекса, разработка которого подготовлена отечественным научно-техническим заделом, рассмотренным в разделе 13.3, качественно расширит получаемую космическими средствами дистанционного зондирования Земли информацию для ее практического использования в глобальной информационной системе.

---

## Заключение

Современные радиолокаторы землеобзора с синтезированной апертурой антенны в своем развитии имеют огромные информационные возможности при совершенствовании способов дистанционного зондирования, алгоритмов и технических средств обработки и интерпретации доставляемой информации, а также совершенствовании элементной базы, использовании нанотехнологий для реализации глобальной аэрокосмической системы для непрерывного отслеживания динамических процессов природного и техногенного характера, контроля состояния экосистем, мониторинга вооруженных конфликтов.

Создана аппаратурная база для реализации космических РСА, в основном удовлетворяющих требованиям гражданских и военных потребителей информации в рамках ограничений Регламента радиосвязи по выделенным частотным диапазонам для дистанционного зондирования Земли из космоса. Развиваются методы радиолокационного зондирования: поляриметрия, интерферометрия, стереометрия, комплексная обработка данных оптического, инфракрасного, СВЧ-диапазонов волн.

Непрерывным фактором извлечения тематической информации по результатам радиолокационного зондирования является применение измерительных технологий. Наряду с использованием амплитудных (или энергетических) изображений, позволяющих измерять эффективную площадь рассеяния (ЭПР) объектов и удельную ЭПР земных покровов при разных поляризациях, получает все большее применение интерферометрическая обработка комплексных изображений (построения карт рельефа местности, дифференциальная интерферометрия, измерение скоростей компактных и распределенных объектов, поляриметрическая интерферометрия).

Активно применяется зондирование в разных диапазонах волн с помощью РСА, размещаемых на разных космических аппаратах. Обеспечивается получение радиолокационных снимков с высоким разрешением (0,5...1,5 м) в 3-см диапазоне волн (PCA SAR Lupe, Cosmo SkyMed, TerraSAR-X) для решения задач видовой разведки, обнаружения малоразмерных объектов на открытой местности, а также с разрешением от 3 м в диапазонах волн 3- и 5,6-см для мониторинга растительного покрова и других задач ДЗЗ. В отличие от сантиметровых диапазонов зондирование в дециметровом диапазоне 23 см с разрешением от 3...7 м (PCA PALSAR) имеет преимущества обнаружения объектов техники под листовым покровом, значительно большей стабильности фазы сигнала для интерферометрической обработки (построения карт рельефа и обнаружения изменений в оперативной обстановке методом дифференциальной интерферометрии). Возрастают возможности оценки объема биомассы и определения типа и состояния растительного покрова.

С учетом указанных особенностей зондирования в сантиметровых и дециметровых диапазонах имеет большие перспективы испытанный в ходе эксплуатации РСА «Меч-К» и «Меч-КУ» на КА «Космос-1870» и «Алмаз-1» и реализуемый в РСА КА «Кондор-Э» 10-см диапазон, который наименее подвержен деструктивным влия-



ниям, нарушающим когерентность сигналов, позволяет получить разрешение от 0,75...1,5 м с изобразительными свойствами получаемых снимков, приближающимися к 23-см диапазону волн и пригодными как для видовой разведки, так и для решения основных задач ДЗЗ.

Важное направление совершенствования РСА, обусловленное улучшением пространственного и радиометрического разрешения – это широкое внедрение методов радиовидения и многопозиционного зондирования с получением трехмерных радиолокационных портретов объектов, детально выявляющих их форму, применение автоматических методов классификации объектов по их радиолокационным портретам и текстуре изображения.

Многопозиционное зондирование и миниатюризация приемных датчиков на дешевых миниспутниках и беспилотных летательных аппаратах позволит обеспечить непрерывный контроль локальных районов для сопровождения военных операций и мониторинга чрезвычайных ситуаций.

Разрабатываемые перспективные средства дистанционного зондирования Земли с использованием многорежимных многофункциональных РСА интегрируются в геоинформационную систему (ГИС), что дает возможность вести более точные расчеты формы геоида для составления высокоточных цифровых карт рельефа, климатических исследований, исследований взаимодействия океан–атмосфера.

Кардинальная проблема дистанционного зондирования Земли, в которой намечены только первые шаги, – решение обратной задачи определения и описания свойств наблюдаемой поверхности, наземных и подземных (подводных) объектов с использованием радиолокационной информации. Решение этой задачи дает простор научной и технической творческой мысли как для радиоинженеров, совершенствующих аппаратуру, так и для радиофизиков, выявляющих связи между параметрами электромагнитного излучения и свойствами объектов.

Геоинформационные технологии, основанные на использовании радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны авиационного и космического базирования, находятся в самом расцвете своего развития. За предшествующие годы силами отечественных и зарубежных ученых были проведены фундаментальные исследования процессов взаимодействия электромагнитного излучения с природными средами и искусственными объектами при распространении и отражении зондирующих радиосигналов, разработана теория построения распределенных антенных систем и их воплощения в динамические многопозиционные структуры синтезированных антенн.

Создание полноценного отечественного сегмента глобальной космической информационной системы двойного назначения способно не только решить изложенные в монографии задачи гражданского и военного применения, но обеспечить переход на новый технологический уровень во многих областях науки и техники, способствуя развитию кадрового резерва и повышению конкурентоспособности отечественных информационных технологий.

---

## Литература

1. *Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А.* Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воениздат, 1970.
2. *Айфичер Э., Джервис Б.* Цифровая обработка сигналов. Практический подход. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
3. *Алябьев А.А., Коберниченко В.Г.* Использование материалов радиолокационной космической съемки для информационного обеспечения мониторинга пространственных данных // Геодезия и картография. 2007. №5. С. 37-45.
4. *Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н.* и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. *В.Т. Горяинова*. М.: Радио и связь. 1988. 304 с.
5. *Арманд Н.А., Захаров А.И.* Современные спутниковые РСА системы для дистанционного зондирования земли: Достижения и перспективы // Труды конференции по ДЗЗ. Муром. 2003.
6. *Астанин Л.Ю., Флерова А.А.* Характеристики антенн при формировании и излучении сверхширокополосных импульсов // Сб. докладов Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». Муром. 2003. С. 67-73.
7. *Атрошенко Л.М., Атрошенко М.Д., Горобец Н.Н., Софронова Л.П.* Повышение надежности прогнозирования урожая по радиолокационным снимкам высокого разрешения // Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004. Т. 2. С. 245-250.
8. *Атрошенко Л.М., Гайкович К.П., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Софронова Л.П.* Оценка радиолокационных контрастов лесонасаждений // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004. Т. 2. С. 251-256.
9. *Атрошенко Л.М., Горобец В.Н., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Софронова Л.П.* Методика описания лесных территорий в целях эффективного дешифрирования спутниковой информации РСА // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004. Т. 2. С. 257-264.
10. *Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н., Костяшкин С.И., Софронова Л.П.* Подспутниковые полигоны Украины // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004. Т. 2. С. 265-271.
11. *Афанасьев И.А.* К истории разработки спутников морской радиоразведки // Новости космонавтики. 2007. № 1.
12. *Афанасьев Ю.А., Нелено Б.А., Селиванов А.С.* и др. Программа экспериментов на ИСЗ «Космос-1500» // Исследования Земли из космоса. 1985. № 3. С. 3-8.
13. *Афраймович Э.Л., Караченцев В.А.* Исследование по данным глобальной сети GPS фазовых искажений сигналов спутниковых радиотехнических систем, обусловленных неоднородной и нестационарной ионосферой Земли // Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Н. Новгород. 2002. С. 100-101.
14. *Афраймович Э.Л., Караченцев В.А., Неудакин А.А.* Методика прогнозирования погрешностей функционирования спутниковых радиотехнических систем, обусловленных неоднородной и нестационарной ионосферой Земли, по данным глобальной сети GPS // Известия ВУЗов. Сер. «Радиоэлектроника». 2003. № 4. С.51-60.
15. *Афраймович Э.Л., Ясюкевич Ю.В.* Адаптивная радиоастрономия // Труды конференции. Секция А. Физика околоземного космического пространства. БШФФ. 2007. С.81-84.

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

16. *Ахметьянов В.Р., Пасмуров А.Я.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. №1.
17. Аэрокосмический радиолокационный мониторинг Земли. Коллективная монография / Под ред. *А.И. Канащенкова*. М.: Радиотехника. 2006. 240 с.: ил.
18. *Бакитко Р.В., Васильев М.Б., Винницкий А.С.* и др. Радиосистемы межпланетных космических аппаратов / Под ред. *А.С. Винницкого*. М.: Радио и связь. 1993. 328 с.: ил.
19. *Балашов И.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Лулян Е.А.* и др. Построение архивов результатов спутниковых данных для систем динамического формирования производных информационных продуктов // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ОАО «Азбука-2000». 2008. Вып.5. Т. 1. С.26-31.
20. *Баскаков В., Горшков А.* Пентагон не боится провалов. Масштабы военно-космических программ США достигли пика // Независимое военное обозрение, 23.05.2003.
21. \**Бахрах Л.Д., Лось В.Ф., Шаманов А.Н.* Широкополосные микрополосковые и вибраторные антенны // Антенны. 2001. Вып.2 (48). С.21-26.
22. *Белокуров А.А.* Методы сглаживания спекл-шума на радиолокационных изображениях земной поверхности // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 6. С.26-35.
23. *Бобокин М.И.* Оценка топографического рельефа местности в РСА при передне-боковом обзоре. Кн. «Цифровая обработка сигналов в РСА» / Под ред. *Е.Ф. Толстова*. Смоленск: Изд-во ВА ВПРО ВС РФ, 2005. С.173-181.
24. *Богомолов А.Ф., Жерихин Н.В., Соколов Г.А.* «Венера-15», «Венера-16»: Радиолокатор с синтезированной апертурой на орбите ИСВ // Изв. ВУЗов. Сер. «Радиофизика». 1985, том XXVIII. № 3. С.259-274.
25. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗОВ. М.: Наука, 1980. 936 с.
26. *Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Кочергин Г.А., Рычкова Н.В.* Мониторинг зерновых культур на юге Западной Сибири по данным MODIS и ERS-2 // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Вып.4. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000». 2004. Т. 2. С.163-188.
27. *Будлянский А.* Господство в воздухе и блицкриг. Некоторые особенности боевого применения ВВС союзников в Ираке // Независимое военное обозрение. 23.01.2004. <http://www.avia.ru/press/4022/>.
28. *Буренин Н.И.* Радиолокационные станции с синтезированной антенной. М.: Сов. радио, 1972. 160 с.
29. *Бычкова И.А., Викторов С.В.* Спутниковый мониторинг портовых комплексов и судоходных трасс Балтийского моря: текущие проблемы // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16-18 июня 2004 г. Т. 1. С.23-27.
30. *Вакман Д.Е., Седлецкий Р.М.* Вопросы синтеза радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1973. 312 с.
31. *Варакин Л.Е.* Теория сложных сигналов. М.: Сов.радио, 1970. 376 с.
32. *Васин С.А., Шустов Л.Н.* Основы радиоэлектронной борьбы. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998.
33. \**Верба В.С.* Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития. М.: Радиотехника, 2008. 432 с.: ил. (Сер. «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности», редактор серии *В.С. Верба*).
34. \**Верба В.С.* Авиационный комплекс радиолокационного дозора и наведения как элемент глобальной сетцентрической системы // Радиотехника, 2008. № 9.
35. \**Верба В.С.* Априорная оценка вероятности обнаружения наземных объектов средствами воздушной разведки // Радиотехника, 2004. № 9. С.32-33.
36. \**Верба В.С.* Метод управления информативностью авиационного комплекса, взаимодействующего с разнородными потребителями информации // Радиотехника. 2006. № 1.
37. \**Верба В.С.* Обнаружение наземных объектов. Радиолокационные системы обнаружения и наведения воздушного базирования. М.: Радиотехника, 2007. 360 с.: ил. (Сер. «Системы

## Литература

- мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности», редактор серии *В.С. Верба*).
38. \**Верба В.С.* Разработка АФАР для авиационных и космических радиолокационных систем // Новые технологии в радиоэлектронике и системах управления. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2004.
  39. \**Верба В.С.* Тенденции развития авиационных и космических средств информационной разведки и дозора // Научные технологии. 2004. № 8–9. С.32–39.
  40. \**Верба В.С.* Управление информационными возможностями многофункциональных бортовых радиолокационных комплексов // Радиотехника, 2006. № 1.
  41. \**Верба В.С.* Формирование режима обнаружения и распознавания наземных целей в многофункциональном авиационном комплексе разведки, оповещения и управления // Радиотехника, 2006. № 1.
  42. \**Верба В.С., Гандурин В.А.* Радиолокатор с синтезированной апертурой на высотном беспилотном дирижабле // Антенны. 2004. № 8-9.
  43. \**Верба В.С., Гандурин В.А., Меркулов В.И.* Стратегические, оперативные и тактические факторы, влияющие на облик авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 5. С.76-84.
  44. \**Верба В.С., Гандурин В.А., Трофимов А.А.* Бортовая РЛС для перспективного многофункционального авиационного комплекса разведки, оповещения и управления (МАК РОУ) с цифровой АФАР // Научные технологии. 2004. № 8–9. С.110-116.
  45. \**Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Радиолокационное зондирование Земли в дециметровых диапазонах волн // Аэрокосмический курьер. 2009. № 6 (66). С.50-52.
  46. \**Верба В.С., Неронский Л.Б., Поливанов С.С.* Тенденции развития систем радиолокационного наблюдения космического базирования // Научные технологии. 2009. Т. 10. № 8. С.3-9.
  47. \**Верба В.С., Осипов И.Г., Неронский Л.Б., Турук В.Э.* Перспективы создания космических РЛС дистанционного зондирования Земли // Аэрокосмическое обозрение. Аналитика, комментарии, обзоры. М.: ООО «Изд. группа «Бедретдинов и Ко», 2007. № 4 (29). С.372–375.
  48. \**Верба В.С., Поливанов С.С.* Организация информационного обмена в сетевых операциях // Радиотехника. 2009. № 8. С.57-62.
  49. \**Витер В., Петровский В., Кучейко А.* Космические аппараты радиолокационного наблюдения, созданные в «НПО машиностроения» // Новости космонавтики. 2001. № 3 (216). С.42-43.
  50. *Внотченко С.Л., Достовалов М.Ю., Зайцев А.Б., Мусинянц Т.Г., Смирнов С.Н.* Результаты измерений ЭПР искусственных и естественных объектов по радиолокационным изображениям РСА «Компакт–100» // Исследования Земли из космоса. 2003. № 6. С.49-57.
  51. *Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Римаев В.В., Шишинов А.В., Нейман И.С.* Радиолокаторы для малых космических аппаратов // III Международная конференция-выставка «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Область эффективного применения в XXI веке». Королев, Московская обл. 27–31 мая 2002 г. Кн. III. С.419-426.
  52. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. *А.Ю. Гринёва*. М.: Радиотехника, 2005.
  53. Всемирная орбитальная группировка космических аппаратов ДЗЗ / Геоматика. Geomatics. Журнал о геоинформатике и дистанционном зондировании. М.: СОВЗОНД, 2008. № 1. С.61-69.
  54. *Вудворд П.* Теория вероятностей и теория информации в применении к радиолокации. М.: Сов. радио, 1955.
  55. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Сканэкс, 1997. 296 с.
  56. *Гафаров А.* Ядерная энергия в космосе: Состояние и перспективы // Новости космонавтики. 2004. Т. 14. № 4 (255). С.38-40. [www.novosti-kosmonavтики.ru/content/numbers/255/01.shtml](http://www.novosti-kosmonavтики.ru/content/numbers/255/01.shtml).
  57. *Глезер В.Д., Цуккерман И.И.* Информация и зрение. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
  58. *Головенко Е.Н., Приходько А.И., Тараненко И.В., Халиманович В.И., Шитлов Г.В.* Транс-

- формируемая крупногабаритная антенна каркасного типа // Решетневские чтения: Материалы X Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет. 2006. С.41.
59. *Горячкин О.В.* Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники. М.: Радио и связь, 2003. 230 с.: ил.
  60. *Градиштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1962.
  61. *Гудкова Н.Л., Ширяев А.М.* Использование в народном хозяйстве СВЧ-аппаратуры дистанционного зондирования из космоса // Зарубежная радиоэлектроника. 1991. № 4. С.86-100.
  62. *Демин В.П., Куприянов А.И., Цветнов В.В.* Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиопротиводействие. М.: Изд-во МАИ, 1998.
  63. \**Дикинс А.В., Иванов А.Ю., Карлин Л.Н., Неронский Л.Б.* и др. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «Алмаз-1». М.: ГЕОС, 1999. 119 с.
  64. До 2015 г. ОАО «Газком» намерено превратить систему спутниковой связи «Ямал» в полномасштабную космическую информационную систему // Информационный бюллетень. ГИС-Ассоциация. 2007. № 1 (58). С.4-12.
  65. *Дорофеев В.* Взгляды американского военного руководства на формы боевого применения космических сил // Зарубежное военное обозрение. 2001. № 8.
  66. *Доставалов М.Ю., Внотченко С.Л., Ермаков Р.В., Жаровская Е.П., Мусиняц Т.Г., Теличев А.В.* Сравнительный анализ радиолокационных характеристик отражения объектов и фоновых поверхностей в X-, L- и УКВ-диапазонах, обусловленных влиянием периодических структур // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Вып.6. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000». 2009. Т. 1. С.122-131.
  67. *Доставалов М.Ю., Внотченко С.Л., Лифанов А.С., Мусиняц Т.Г.* Система автоматизированного распознавания объектов на основе исследования радиолокационных портретов по изображениям РСА «Компакт-100» // Исследования Земли из космоса. 2005. № 1. С.51-65.
  68. *Доставалов М.Ю., Лифанов А.С., Мусиняц Т.Г.* Использование метода Change Detection для обнаружения объектов на радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 4. С.15–26.
  69. \**Доставалов М.Ю., Неронский Л.Б., Переслегин С.В.* Исследования поля скорости океанских течений по фазометрическим данным, полученным РСА космического аппарата «ERS» // Океанология. 2003. Т. 43. № 3. С.473-480.
  70. *Дьяконов В.П.* MATLAB 6.6/6.1/6.5/6.5+SP1 Simulink 5/5. Обработка сигналов и изображений. Сер. «Полное руководство пользователя». М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 592 с.: ил.
  71. *Евтюшкин А.В., Филатов А.В.* Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом SAR-интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\ PALSAR // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Вып. 6. М.: ИКИ РАН. Изд-во. ОАО «Азбука-2000», 2009. Т. 1.
  72. Ежегодник «Космическая съемка Земли. 2007–2008». Справочные данные и дополнения по спутникам съемки Земли. Справочно-аналитическое издание / Под ред. *Ю.А. Подъездова*. М.: Радиотехника, 2008.
  73. \**Елизаветин И.В.* Оценка влияния некогерентного накопления при обработке данных с космического аппарата «Алмаз-1» // Исследование Земли из космоса. 1993. №1. С.32-35.
  74. *Елизаветин И.В., Гудилин Д.С., Семёнов О.И.* Сравнительная оценка фильтрации радиолокационных снимков с использованием вейвлет-преобразований // Аэрокосмические технологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции (22 мая 2002 г., Реутов, ФГУП «НПО машиностроения») / Под ред. *Р.П. Симоньянца*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. С.233-243.
  75. *Елсаков В.В.* Развитие спутникового мониторинга экосистем европейских тундр с использованием данных SAR/ERS-2 // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного

## Литература

- зондирования из космоса». Вып.5. М.: ИКИ РАН. Изд-во «Азбука». 2008. Т. 2. С.483–488.
76. \*Елюшкин В.Г., Пронин Б.В. Фотограмметрическая обработка радиолокационных снимков. М.: Недра, 1993. 191 с.
  77. Живичин А.Н., Соколов В.С. Дешифрирование фотографических изображений. М.: Недра, 1980. 253 с.
  78. Заболоцкий В.Р. Применение космических радиолокационных изображений РСА КА «Алмаз-1» для исследования сельскохозяйственных культур // Исследования Земли из космоса. 1996. № 2. С.106-110.
  79. Загородников А.А. Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 239 с.
  80. Захаров А.И. Измерение полной матрицы рассеяния земных покровов спутниковым поляриметрическим РСА // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004 г. Т. 1. С.60-64.
  81. Захаров А.И., Жердев П.А., Борисов М.М., Соколов А.Б. Калибровка современных космических РСА с помощью антенных рефлекторов // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург, 16–18 июня 2004 г. Т. 3. С.47-50.
  82. Захаров А.И., Машуров С.С. Использование стабильных отражателей в схеме интерферометрической съемки TERRASAR-X при мониторинге карстовых территорий Нижегородской области // IV Всероссийская научная школа и конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, 2009.
  83. Захаров А.И., Машуров С.С. Мониторинг магистрального газопровода на оползневом участке Кубанского края с помощью интерферометрической съемки радара TERRASAR-X // IV Всероссийская научная школа и конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, 2009.
  84. Захаров А.И., Хренов Н.Н. Радиолокационные интерферометрические методы наблюдения Земли в задаче мониторинга подвижек газопроводов // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004 г. Т. 3. С.110–114.
  85. Захарова Л.В., Захаров А.Н. Исследование динамики волжских берегов Ульяновска методом радиолокационной интерферометрии // VI открытая Всероссийская конференция. «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 10–14 ноября 2008 г.
  86. Захарова Л.Н. Использование интерферометрической когерентности по данным полнополяриметрического РСА для классификации земных покровов // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000», 2008. Вып.5. Т. 1. С.96-101.
  87. Захваткина Н. Ю., Александров В. Ю., Коросов А. Классификация морских льдов на РСА-изображениях спутника ENVISAT // VI Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» / Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 10–14 ноября 2008 г.
  88. \*Землянов А.Б., Коссов Г.Л., Траубе В.А. Система морской космической разведки и целеуказания (история создания). С.-Петербург: ООО «Галей Принт», 2002. 216 с.
  89. Зиновьев В.Г., Полетаев А.М., Присяжнюк С.П. Проблемы стандартизации в области дистанционного зондирования Земли // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Вып.5. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000», 2008. Т. 1. С.133-137.
  90. \*Зраенко С.М., Коберниченко В.Г. Цифровое синтезирование апертуры при кусочнолинейной аппроксимации опорной функции // Известия вузов. М.: Радиоэлектроника, 1987. Т. 30. № 8. С.8-12.
  91. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной по-

- верхности. М.: Сов. радио, 1968. 224 с.
92. *Зубченко Э.С.* Методы радиолокационного и электромагнитного зондирования морских акваторий для картографирования рельефа дна // *Навигация и гидрография*. 2007. № 24. С.152-162.
  93. *Иванов А.Ю., Затягалова В.В.* Картографирование загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // *Исследование Земли из космоса*. 2007. № 6. С.46-63.
  94. *Иммореев И.Я.* Сверхширокополосные радиосистемы. Обзор состояния и перспективы развития / *Труды НТОРЭС им. А.С.Попова: Сер. «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике»*. М.: 2005. С.9-14.
  95. *Инженерный справочник по космической технике*. Изд. 2-е перераб. и доп. / Под ред. *А.В. Солодова*. М.: Воениздат, 1977. 430 с.
  96. *Информационные технологии в радиотехнических системах: Учебное пособие: В.А. Васин, И.Б. Власов, Ю.М. Егоров и др.* / Под ред. *И.Б. Федорова*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 677 с.: ил. (Сер. «Информатика в техническом университете»).
  97. *Исходные данные по информационным параметрам перспективной космической системы дистанционного зондирования Земли (ПКС ДЗЗ)*. М.: РКА, 1993.
  98. *Каневский М.Б.* Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2004. 124 с.
  99. *Караваев В.В., Сазонов В.В.* Основы теории синтезированных антенн. М.: Сов. радио, 1974.
  100. *Карпов О.А., Луканидин А.М., Нечаев В.М., Овчинников А.А.* и др. Экспериментальная проверка алгоритмов межпериодного расширения спектра в РСА. Кн. «Цифровая обработка сигналов в РСА» / Под ред. *Е.Ф. Толстова*. Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. С.226-230.
  101. *Катрона Л.Дж., Лейт Е.Н., Палермо К.Дж., Порцелло Л.Дж.* Оптические системы фильтрации и обработки сигналов // *Зарубежная радиоэлектроника*. 1962. № 10.
  102. *Кислицкий М.И.* Космическая система радиолокационного мониторинга «Север» // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Вып.5. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000», 2008. Т. 1. С.273-279.
  103. *Классен В.И., Кинбер Б.Е., Шишилов А.В., Тоболев А.К.* Гибридные и полифокальные антенны. Обзор «Антенны». М.: Радио и связь, 1987.
  104. *Коберниченко В.Г.* Использование данных космических систем наблюдения для мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на региональном уровне // *Вестник УГТУ-УПИ*. На передовых рубежах науки и инженерного творчества. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. № 15 (45). С.105-107.
  105. *Коберниченко В.Г., Доросинский Л.Г.* Методика анализа помехозащищенности РСА // *Труды VII Международной НТК «Радиолокация, навигация, связь»*. 24–26 апреля 2001 г. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета. 2001. Т. 3. С.1438-1443.
  106. *Коваленко А.И.* Амплитудно-фазовые характеристики функции импульсного отклика широкополосных радиолокаторов с синтезированной апертурой в областях формирования сигналов доплеровской неоднозначности // *Труды НТОРЭС им. А.С.Попова: Сер. «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике»*. М., 2005. С.58-62.
  107. *Коваленко А.И.* Анализ эффекта доплеровской неоднозначности для высокдетальных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // *Труды XXIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред»*. Вып.5. С.-Петербург: НИЦ 2 4 ЦНИИ МО РФ, 2005. С.48-55.
  108. *Коваленко А.И.* Анализ эффекта доплеровской неоднозначности для космических радиолокаторов с синтезированной апертурой детального наблюдения Земли // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2008. Т. 13. № 4. С.22-33.
  109. *Коваленко А.И.* Метод одномерной избирательной редукиции доплеровской неоднозначности для радиолокаторов с синтезированной апертурой детального наблюдения Земли // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2008. Т. 13. № 6. С.64-73.
  110. *Коваленко А.И.* Методика оценки уровня доплеровской неоднозначности для широкопо-

## Литература

- лосных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // II Всероссийская научная конференция-семинар «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике»: Сб. докладов. Муром, 2006. С.327-331.
111. *Коваленко А.И.* Методика оценки уровня доплеровской неоднозначности для широкополосных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Труды XXIV Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». Вып.6. С.-Петербург: НИЦ 4 ЦНИИ МО РФ. 2006. С.104-111.
112. *Коваленко А.И., Риман В.В.* Дифференциальные методы редукции эффекта неоднозначности в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой // Международная научная конференция к 95-летию академика В.А. Котельникова «Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В.А. Котельникова». М.: Изд-во МЭИ, 2003. С.88-90.
113. *Коваленко А.И., Риман В.В.* Особенности формирования радиолокационных изображений в высокодетаальных радиолокаторах с синтезированной апертурой // Труды XVI–XIX Всероссийских симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред». Вып.2. С.-Петербург: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 2002. С.102-114.
114. *Козлов И.Е., Сычев В.И.* Реанализ проявлений океанских внутренних волн на изображениях РСА спутника «Алмаз-1» // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004 г. Т. 2. С.108-116.
115. *Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.Я.* Распространение радиоволн при космической связи / Под ред. акад. *Б.А. Введенского* и проф. *М.А. Колосова*. М.: Связь, 1969. 155 с.: ил. <ftp://ftp.kiam1.rssi.ru/pub/gps/book/arm/>.
116. *Колосов М.А., Шабельников А.В.* Рефракция электромагнитных волн в атмосфере Земли, Венеры, Марса. М.: Сов. радио, 1976.
117. *Кондратенков Г.С.* Ультразвуковой спектроанализатор радиолокационных сигналов с использованием явления дифракции света на ультразвуковых волнах в прозрачной среде, возбуждаемых радиолокационными сигналами / Авт. свид. №21080, 08.09.1959.
118. *Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.* Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: Учебное пособие для вузов / Под ред. *Г.С. Кондратенкова*. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.: (Сер. «Радиолокация»).
119. *Кондратенков Г.С., Холятник В.А., Иванисов Б.А.* Статистические характеристики сигналов РСА дециметрового диапазона // Радиотехника. 2000. № 3.
120. *Копылов В.Н., Кочергин Г.А., Полищук Ю.М., Хамедов В.А.* Использование данных ДЗЗ при решении региональных задач рационального природопользования. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса // Тезисы конференции, ИКИ РАН. 2008.
121. *\*Королев А.В., Коршиков Я.В.* Экспериментальное исследование транзисторных усилителей мощности ЛЧМ-сигналов // Сб. докладов XII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2006. Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО. 2006. Т. 1. С.1110-1115.
122. *\*Королев А.В., Коршиков Я.В., Птицина С.Е.* Унификация схемотехнических решений в усилителях мощности ДМВ-диапазона // Сб. докладов XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2009. Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО. 2009. Т. 2. С.1128-1135.
123. *\*Королев А.В., Троицкий Ю.Н., Ростовцев А.А., Коршиков Я.В.* Передающее устройство S-диапазона для бортового космического радиолокатора // Сб. докладов XI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2005. Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО. 2005. Т. 1. С.357-363.
124. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» №1. Справочные материалы. Под ред. *Л.А. Макриденко, С.Н. Волкова, Ю.В. Трифонова, А.В. Горбунова*. М.: ФГУП «НПП ВНИЭМ». 2008. 143 с.
125. Космическая съемка Земли. Космическая радиолокационная съемка поверхности Земли. Спра-



## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

- вочно-аналитическое издание/ Под ред. Ю.А. Подъездкова. М.: Радиотехника. 2004. 66 с.: ил.
126. Космическая съемка Земли. Справочно-аналитическое издание / Под ред. Ю.А. Подъездкова. М.: Радиотехника. 2006. 358 с.: ил.
  127. Космические радары: «9:0» не в пользу России // ГИС и GPS, 21.12.07.
  128. Кретов Н.В., Рыжкина Т.Е., Федорова Л.В. Влияние земной атмосферы на пространственное разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования // Радиотехника и электроника. 1992. № 1. С.90-95.
  129. Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Островский А.Г. Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Вып.4. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000», 2007. Т. 1. С.295-303.
  130. \*Куликовский М.Г. Контроль разрешающей способности космического радиолокатора с синтезированной антенной при наземных испытаниях // Научные технологии. 2007. № 10.
  131. \*Куручкин А.П. Развитие антенно-фидерной и оптоэлектронной техники в ОАО «Концерн радиостроения «Вега» // Научные технологии. 2004. № 8–9. С.40-59.
  132. \*Куручкин А.П., Андрианов В.И., Верба В.С. и др. Вопросы построения АФАР для авиационных и космических радиолокационных комплексов наблюдения // Антенны. 2004. Вып.8–9 (87–88). С.56-64.
  133. \*Куручкин А.П., Андрианов В.И., Верба В.С., Козлов К.В., Крицкий С.В., Рыков В.В., Якубень Л.М. Вопросы построения АФАР для авиационных и космических радиолокационных комплексов наблюдения // Антенны. 2004. № 8–9. С.56-64.
  134. \*Кушнерёв Н.А. Устройство электропитания импульсного твердотельного передатчика // Радиотехника. №5, 2009
  135. Лапто С.С., Арманд Н.А., Волков А.М. и др. О концепции развития космической океанологии в России на 1996–2015 гг. // Исследование Земли из космоса. 1997. № 2. С.70-80.
  136. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. М.: Сов. радио, 1968. 504 с.
  137. \*Лиханский С.Г. Модификация технологии синтеза радиолокационных изображений, основанной на гармоническом анализе, применительно к ситуации прожекторного режима для космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Научные технологии. 2008. № 2. С.38-55.
  138. \*Лиханский С.Г. Модифицированный метод скользящего окна как способ компенсации строб-эффекта и одновременно повышения производительности сверточных алгоритмов синтеза в прожекторном режиме // Научные технологии. 2006. № 10.
  139. \*Лиханский С.Г. Новая технология прецизионного масштабирования радиолокационных сигналов, обобщающая известный Chirp-Scaling-оператор // Научные технологии. 2006. № 7–8. С.72-79.
  140. \*Лиханский С.Г. Повышение производительности двумерно-сверточных алгоритмов синтеза РЛИ в прожекторном режиме методом когерентного накопления сигнала по сомкнутым субкадрам, в сумме составляющим интервал синтеза // Научные технологии. 2004. № 5. С.22-33.
  141. \*Лиханский С.Г. Применение метода прецизионного масштабирования в когерентной радиолокационной картографии // Научные технологии. 2004. № 2–3. С.41-52.
  142. Маров М.Н., Штагер Е.А. Сравнение радиолокационных характеристик айсбергов и судов // Труды XX и XXI Всероссийских симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред». С.-Петербург. 2003. Вып.3. С.94-100.
  143. Методы, процедуры и средства аэрокосмической компьютерной радиотомографии приповерхностных областей Земли / Под ред. С.В. Нестерова, А.С. Шамаева, С.И. Шамаева. М.: Научный мир, 1996. 272 с.
  144. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Радиолокационные наблюдения поверхностных пленочных загрязнений в прибрежной зоне Черного и Азовского морей // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Вып.4. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000», 2007. Т. 1. С.317-324.

## Литература

145. *Михайлов В.Я.* Фотография и аэрофотография. М.: Изд-во геодезической и картографической литературы. 1952.
146. *Михайлов Б.А., Кондратенков Г.С.* Сравнение методов повышения разрешающей способности радиолокационных устройств по угловым координатам // Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 1961. Вып. 883.
147. *Назаров Л.Е., Чухланцев А.А.* Моделирование нейросетевых алгоритмов оценки биофизических параметров почвы и растительных покровов с использованием данных пассивной и активной радиолокации // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004 г. Т. 1. С.110-113.
148. Научные школы Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского (Военного авиационного технического университета). М.: Изд-во «Академии Авиации», 2000. 466 с.
149. \**Неронский Л.Б.* Аналитическая аппроксимация сенситометрической кривой фотоматериалов // Техника кино и телевидения. 1977. С.21-22.
150. \**Неронский Л.Б., Верба В.С., Лиханский С.Г., Осипов И.Г., Пуцинский С.Н., Турук В.Э.* Формирование точечных моделей объектов по комплексным РСА изображениям // Труды седьмой Всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН. 16–20 ноября 2009 г.
151. \**Неронский Л.Б.* Влияние нелинейности регистратора на различимость контрастов при визуальном дешифрировании РЛИ // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Общетехническая». 1978. Вып.9. С.13-34.
152. \**Неронский Л.Б.* Оценка разрешающей способности РЛС с синтезированной антенной по переходным функциям и интервалу корреляции выходного сигнала // Радиотехника и электроника. 1975. Т. XX. № 2. С.271-279.
153. \**Неронский Л.Б.* Перспективы совершенствования космических средств радиолокационного наблюдения земной поверхности // Научные технологии. 2004. № 8–9. С.66-87.
154. \**Неронский Л.Б., Беленкова Н.С.* Расчет условий обнаружения флуктуирующего сигнала на выходе квадратичного детектора с накоплением // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Общие вопросы радиоэлектроники». 1984. Вып. 3. С.3-8.
155. \**Неронский Л.Б., Виноградный А.В., Тимофеев Л.М.* Моделирование преобразований сигналов в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны. Лабораторный практикум: Учебное пособие / Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет). М. 2003. 72 с.
156. \**Неронский Л.Б., Гончаренко М.В.* Установка для фотометрических измерений с высоким разрешением // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Общетехническая». 1972. Вып. 3. С.49-57.
157. \**Неронский Л.Б., Иванов О.Ю., Коберниченко В.Г.* Быстрый алгоритм цифрового синтеза апертуры // Радиотехника. 1994. Т. 49. № 1.
158. \**Неронский Л.Б., Коберниченко В.Г., Зраенко С.М.* Цифровое синтезирование радиолокационных изображений земной поверхности в радиолокаторе с синтезированной апертурой космического аппарата «Алмаз-1» // Исследования Земли из космоса. 1993. № 4. С.33-43.
159. \**Неронский Л.Б., Лиханский С.Г., Елизаветин И.В., Сысенко Д.В.* Модель временных зависимостей фазы и амплитуды, адаптированная к радиолокационному обзору в космических РСА // Исследования Земли из космоса. 2003. № 6. С.58-71.
160. \**Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В.* Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: Учебное пособие / СПбГУАП. С.-Петербург. 1999. Ч. 2. 220 с.
161. \**Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Верба В.С.* Моделирование метода пространственно-частотной фильтрации для селекции движущихся целей в РСА // Труды XXII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». Вып.4. Изд-во Полиграфический центр Автономной некоммерческой организации. Секция «Инженерные проблемы стабильности и конверсии» Российской инженерной академии (СИП РИА). М., 2005. С.7-15.
162. \**Неронский Л.Б., Пушков Д.В., Елизаветин И.В.* Применение моделирования преобразова-

- ний сигналов в РСА для интерпретации данных ДЗЗ. Труды конференции по дистанционному зондированию Земли // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004 г. Т. 3. С.145-150.
163. \**Неронский Л.Б., Салганик П.О., Яркин В.Ф.* Экспериментальное исследование различимости распределенных целей на радиолокационных изображениях // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Общетехническая». 1979. Вып. 1. С.23-36.
164. \**Неронский Л.Н., Достовалов М.Ю., Переслегин С.В.* Улучшенные алгоритмы измерения доплеровской частоты сигналов РСА // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург. 16–18 июня 2004 г. Т. 3. С.140-144.
165. *Никольский Д.Б.* Передовые направления в обработке и применении радиолокационных данных // Геоматика. Geomatics. Журнал о геоинформатике и дистанционном зондировании. М.: СОВЗОНД, 2008. № 1. С.23-24.
166. \**Нявро Б.П., Шилин Б.В., Ефремов Г.А., Салганик П.О., Неронский Л.Б.* и др. Радиолокация геологических структур с ИСЗ «Космос-1870» // Сб. «Экспресс-информация Совета по космическим исследованиям АН СССР». Л.: ВНИИКАМ, 1989.
167. Обнаружение и распознавание объектов радиолокации. Коллективная монография / Под ред. *А.В. Соколова*. М.: Радиотехника. 2006.
168. *Оттенгейм А.В., Шафер Р.В.* Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. *С.Я. Шаца*. М.: Связь. 1979.
169. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. *Г.С. Нариманова*. М.: Машиностроение. 1972.
170. *Охонский А.Г.* Подавление азимутальных выбросов в искусственной диаграмме направленности РСА // Труды XXII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». Вып.4. М.: ИПЦ АНО «СИП РИА», 2005. С.129-138.
171. *Охонский А.Г.* Подавление боковых выбросов диаграммы направленности РЛС с синтезированной апертурой в азимутальной плоскости // Межвузовский сборник научных трудов «Пространственно-временная обработка радиолокационных сигналов». Л.: ЛИАП. 1990. С.65-69.
172. \*Патент на изобретение RU №2310886 С1, МПК 7 G01S 13/90 (2006.01). Космический многорежимный поляриметрический радиолокатор с синтезированной апертурой со сканирующей зеркальной антенной / Открытое акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега» (RU)/ Авторы: *Неронский Л.Б., Андрианов В.И., Верба В.С., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Заявка №2006103346. Приоритет 07 февраля 2006 г. Зарег. 20 ноября 2007 г.
173. \*Патент на изобретение RU №2352033 С1, МПК 7 H01Q 1/100 (2006.01). Гибридная зеркальная антенна с расширенными углами сканирования / Открытое акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега» (RU)/ Авторы: *Неронский Л.Б., Андрианов В.И., Верба В.С., Осипов И.Г., Егоров М.А.* Заявка № 2007127775/09. Приоритет 20.07.2007, опубликовано 10.04.07. Бюл. №10.
174. \**Переслегин С.В.* Связь СВЧ-рассеяния от морской поверхности с пространственно-временными характеристиками развитого волнения // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 5. С.481-490.
175. \**Переслегин С.В.* Статистические характеристики СВЧ-рассеяния от морской поверхности с учетом конечного разрешения и фактора деполяризации // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 6. С.610-619.
176. \**Переслегин С.В., Достовалов М.Ю., Манаков В.Ю., Неронский Л.Б.* Формирование ярких и скоростных изображений морской поверхности в радиолокаторах с синтезированной апертурой // Сб. Труды ИПФ. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2003.
177. \**Переслегин С.В., Достовалов М.Ю., Сажнева А.Э., Неронский Л.Б., Осипов И.Г.* Яркие и скоростные радиолокационные портреты океанских явлений // II Всероссийская научная конференция. Сб. докладов «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими методами». С.-Петербург, 16–18 июня 2004 г. Т. 2. С.82-91.

## Литература

178. *Переслегин С.В., Елизаветин И.В., Иванов А.Ю.* Измерение параметров ветровых волн в области атмосферного циклона по данным поляризационного космического РСА // Сб. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2006. Вып.3. Т. II. С.140-148.
179. *Переслегин С.В., Королев А.М., Маров М.Н.* Анализ доплеровского радиолокационного метода измерений поля мезомасштабных океанических течений с орбитального аппарата // Исследование Земли из космоса. 1994. № 2. С.84-93.
180. *Переслегин С.В., Королев А.М., Маров М.Н.* и др. Радиолокационные измерения мезомасштабных полей течений океана по данным РСА КА АЛМАЗ-1 // Исследование Земли из космоса. 1994. № 4. С.28-38.
181. \**Переслегин С.В., Неронский Л.Б., Плющев В.А.* Флуктуационно-уровневая чувствительность РЛ интерферометра при двухпозиционном зондировании морской поверхности // В сб. «Проявления глубинных процессов на морской поверхности». Н. Новгород: ИПФ РАН, 2008. Вып.3.
182. *Переслегин С.В., Халиков З.А.* Двухпозиционная радиолокация морской поверхности // В сб. «Проявления глубинных процессов на морской поверхности». Н. Новгород: ИПФ РАН, 2008. Вып.3.
183. \**Переслегин С.В., Халиков З.А., Неронский Л.Б.* Физическое обоснование радиолокационной космической системы, решающей задачу раннего обнаружения опасных океанических явлений // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Вып.5. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000», 2008. Т. 2. С.180-191.
184. *Перминов А.Н., Меньшиков В.А.* Реализация единой социоприродной стратегии освоения космоса / Программа Интернет-брифингов пресс-службы Федерального космического агентства. Изд-во «РЕСТАРТ», 2009. Веб-сайт [http://www.federalspace.ru/program\\_brifing.asp](http://www.federalspace.ru/program_brifing.asp).
185. \**Плющев В.А.* Результаты разработки и направления развития многочастотных авиационных комплексов РСА // Научно-технические технологии. 2004. № 8–9. С.88-100.
186. Подповерхностная радиолокация / Под ред. *М.И. Финкельштейна*. М.: Радио и связь. 1994.
187. *Охонский А.Г., Елисеев А.А., Каплунова Н.В.* и др. Помехоустойчивость информационных радиосистем управления: Учеб. пособие / Под ред. *А.Г. Охонского*. М.: МГАП «Мир книги», 1993. 216 с.: ил.
188. *Пономаренко С.Н.* Adobe Photoshop 5.0. С.-Петербург: БХВ, 2000. 512 с.
189. *Порцелло Л.Дж.* // Зарубежная электроника. 1972. № 3. С. 15.
190. *Приклонская В.И.* Использование геометрических и энергетических признаков при обнаружении и распознавании аномалий морской поверхности // Сб. научных трудов ФГУП «ЦНИИ «Комета» «Космические информационно-управляющие системы». М. 2008. Вып.2. С.48-54.
191. Программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования Земли. ЗАО «Фирма «Ракурс». <http://www.racurs.ru/>.
192. \**Радиолокационная фотограмметрия / В.И. Аковецкий, Г.Н. Донсков, Ю.Н. Корнеев, Л.Б. Неронский*. М.: Недра, 1979. 239 с.
193. Радиолокационные методы исследования Земли / *Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович, В.Д. Степаненко* и др. / Под ред. *Ю.А. Мельника*. М.: Сов. радио, 1980. 264 с.
194. Радиолокационные системы воздушной разведки. Дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. *Л.А. Школьного*. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
195. Радиолокационные станции бокового обзора / Под ред. *А.П. Реутова*. М.: Сов. радио, 1970.
196. *Кондратенков Г.С., Потехин В.А., Реутов А.П., Феоктистов Ю.А.* Радиолокационные станции обзора Земли / Под ред. *Г.С. Кондратенкова*. М.: Радио и связь, 1983. 272 с.
197. *Назирова М., Пичугин А.П., Спиридонов Ю.Г.* Радиолокация поверхности Земли из космоса. Исследования морской поверхности, ледяного и ледникового покровов с помощью спутниковой радиолокационной станции бокового обзора. Монография / Под. ред. *Л.М. Митника, С.В. Викторова*. Л.: Гидрометеиздат, 1990.
198. Регистрирующие среды для голографии / Под ред. *Н.И. Кириллова, В.А. Барачевского*. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1975. 165 с.

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

199. Регламент радиосвязи Российской Федерации. Государственная комиссия по радиочастотам при Госкомсвязи Российской Федерации / Официальное издание. М., 1999.
200. \**Реутов А.П.* Радиолокация на магистралях технологического прогресса XXI века // Научно-технические технологии. 2004. № 8–9. С.23–31.
201. *Рог В.* Война высоких технологий. Операции в Персидском заливе – новое в теории и практике боевых действий // Независимое военное обозрение, 21.05.2005. <http://www.aviaport.ru/digest/2005/01/21/87330.html>.
202. *Рог В., Соловьев В.* Принципиально новые лекала военных кампаний. // Независимое военное обозрение, 04.08.2006. [http://www.logistics.ru/9/4/1/i77\\_28184p2.htm](http://www.logistics.ru/9/4/1/i77_28184p2.htm).
203. *Родионова Н.В.* Применение поляризационной разности фаз в задачах распознавания объектов на радарных изображениях // IV Всероссийская научная школа и конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, 2009.
204. *Роуз А.* Зрение человека и электронное зрение. М.: Мир, 1977. Т. 1.
205. *Рубахин В.Ф.* Психологические основы обработки первичной информации. Л.: Наука. 1974. 296 с.
206. \**Савосин Г.В., Серяпин А.В., Шило В.К., Виленко И.Л., Неронский Л.Б., Королев А.В.* Крупногабаритные гибридно-зеркальные антенны с облучателями в виде АФАР // Решетневские чтения: Материалы X Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2006.
207. \**Салганик П.О.* К расчету разрешающей способности РЛС по пространственным координатам // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Общетехническая». 1974. Вып.1. с.3–19.
208. \**Салганик П.О., Ефремов Г.А., Неронский Л.Б., Куликовский М.Г., Курмаев А.А.* Радиолокационное зондирование Земли с ИСЗ «Космос-1870» // Исследование Земли из космоса. 1990. № 2. С.70–79.
209. *Сарычев В.А.* Попытка характеристики очередного этапа развития радиолокационной науки и техники // Радиопромышленность. 1996. Вып.2. С.81–92.
210. Сборник рабочих материалов по Международному регулированию планирования и использования радиочастотного спектра (с учетом изменений, принятых ВКР-2007. Тома 1–4. НПФ «Гейзер», 2009. <http://www.geyser.ru/rus/products/>.
211. Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса // VI открытая Всероссийская конференция // Сб. научных статей. Вып. 6. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000». 2009.
212. Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов // Сб. научных статей. Вып. 5. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука—2000». 2008. Т. I. 575 с. Т. II. 595 с.
213. Справочник по радиолокации / Под ред. *М. Скольника* (Нью-Йорк, 1970). / Пер с англ. (в четырех томах) под общей ред. *К.Н. Трофимова*. Т. 2 // Радиолокационные антенные устройства. Под ред. *П.И. Дудника*. М.: Сов. радио, 1977. 408 с.
214. Справочник по радиолокации / Под ред. *М. Скольника*, Нью-Йорк, 1970. / Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. *К.Н. Трофимова*. Т. 1 // Основы радиолокации. Под ред. *Я.С. Ицхоки*. М.: Сов. радио, 1976. 456 с.
215. Спутники радиолокационного зондирования Земли // Приложение №1 к журналу «Спутниковые системы связи и вещания». М.: Радиотехника, 2000. 86 с.
216. *Стрелюк Ю.В.* Военная активность в околоземном пространстве. Противоспутниковые системы // Лекция. М.: МФТИ, 21 апреля 2005 г. <http://www.armscontrol.ru/course/lectures05a/yvs050428t.htm>.
217. Таблица распределения полос частот между радиослужбами Российской Федерации, утвержденная постановлением Правительства РФ от 15 июля 2006 г. №439-23.
218. *Тарасенко М.* Военные картографы США будут пользоваться коммерческими спутниками // Новости космонавтики. 1998. № 23/24 (190/191). С.37.

## Литература

219. *Татевян С.К.* Глобальная геодезическая система GGOS (Научные цели и статус). Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса // VI открытая Всероссийская конференция. Сб. научных статей. Вып. 6. М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000». 2009. Т. 1. С.58.
220. *Толстов Е.Ф., Яковлев А.М., Карнов О.А.* Радиолокационный комплекс аппаратуры наблюдения в программе «Открытое небо» // Радиотехника №11. Сер. «Радиолокационные системы и системы радиуправления» №2. Вып.6. 1995. С.54-57.
221. *Кузьмин Б.С., Герасимов Ф.Я., Молоканов В.М.* и др. Топографо-геодезические термины. Справочник. М.: Недра. 1989. 261 с.
222. \*Траектория полета. ЦКБ-17, НИИ-17, МНИИП. ОАО «Концерн «Вега». М.: Оружие и технологии, 2005. 252 с.: ил.
223. \*Турук В.Э., Неронский Л.Б., Порохов И.О. Выбор технических характеристик РСА универсального назначения для малого космического аппарата // Вопросы радиоэлектроники. Сер. «Общетехническая». Вып.1. М. 2002. С.43-52.
224. *Уманский В.И., Железнов М.М., А.С.Василейский А.С., Милосердов В.В.* Интерферометрическая обработка спутниковой радиолокационной информации для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // VI открытая Всероссийская конференция. «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 10–14 ноября 2008 г.
225. *Файнберг Е.Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Изд-во АН СССР. 1961.
226. *Феоктистов Ю.А.* Системный подход в радиотехнике // Радиотехника. 1996. № 1. С.5-8.
227. *Фукс И.М.* К теории рассеяния радиоволн взволнованной поверхностью моря // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1966. Т. 6. № 5. С.876-885.
228. *Хармут Х.Ф.* Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. М.: Радио и связь. 1985.
229. *Хемминг Р.В.* Цифровые фильтры. М.: Недра. 1987. 221 с.
230. *Хермандер Л.* Анализ линейных дифференциальных операторов. Т. 3. Псевдодифференциальные операторы. М.: Мир. 1987.
231. *Цветков О.Е.* Алгоритмы обработки сигналов в РСА с миграцией дальности: Кн. «Цифровая обработка сигналов в РСА» / Под ред. *Е.Ф. Толстова*. Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. С.71-76.
232. \**Челомей В.Н., Ефремов Г.А., Литовченко К.Ц., Неронский Л.Б., Семенов С.С., Салганик П.О., Эткин В.С.* и др. Радиолокация морской поверхности с высоким разрешением с ИСЗ «Космос-1870» // Исследования Земли из космоса. 1990. С.80-90.
233. *Чернов А.А., Чернявский Г.М.* Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения. М.: Радио и связь. 2004. 200 с.: ил.
234. *Черняк В.С.* Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь. 1993.
235. *Чупарис В.* // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 8.
236. \**Шахгеданов В.Н.* Авиационная система наблюдения «Открытое небо». Научные технологии. 2004. № 8–9. С.101-109.
237. *Шелестов А.Ю., Скаун С.В., Тищенко Ю.Г.* Комплексование радиолокационных данных для решения задач спутникового мониторинга // Сб. научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН. Изд-во ОАО «Азбука-2000». 2008. Вып. 5. Т. 1. С.181-188.
238. *Ширман Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П., Братченко Г.Д., Орленко В.М.* Методы радиолокационного распознавания и их моделирование // Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 11. С.3-63.
239. Широкополосные и сверхширокополосные сигналы и системы / Успехи современной радиоэлектроники. Тематический выпуск. 2009. № 1–2.
240. *Штагер Е.А.* Методы расчета радиолокационных характеристик объектов, находящихся вблизи неровной земной или морской поверхности // Зарубежная радиоэлектроника. 1994.

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

- № 4–5. С.22–40.
241. \*Штейншлейгер В.Б., Дзенкевич А.В., Манаков В.Ю., Мельников Л.Я., Мисежников Г.С. О разрешающей способности транссионферных РЛС для дистанционного зондирования Земли в УКВ-диапазоне волн // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 6. С.725-732.
  242. Яковлев В.П. Основные результаты опытной эксплуатации радиолокатора с синтезированной апертурой КА «Алмаз» // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 5. С.28-40.
  243. \*Янушевский Г.Д., Пилипец Ю.С., Цыркин В.В., Смирнов Ю.А. Синтезатор частот и широкополосных ЛЧМ-сигналов S-диапазона // XVI EFTF European Frequency and Time Forum. С.-Петербург. Март 2001 г.
  244. \*Янушевский Г.Д., Верба В.С., Рыков С.Г. Цифровой синтезатор широкополосных сигналов S-диапазона // Материалы XI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2005. Т. 1.
  245. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. М.: Сов. радио. 1977. 176 с.
  246. Algra T., Bierens L. Frequency domain raw data compression for multi-mode satellite instruments // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18, 2006.
  247. \*Bakhrakh L.D., Los' V.F., Shamanov A.N. Ultrawideband method of feeding a dipole antenna // Proc. of IV International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine. Sept 9–12, 2003. V. II. P.535-538.
  248. Bamler R. «A comparison of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms» // IEEE Trans. on GRS. July 1992. V. 30. No. 4. P. 706-713.
  249. Bamler R. A systematic comparison of SAR focusing algorithms // Proc. IGARSS'91, IEEE Espoo, Finland. June 1991. P.1005-1009.
  250. Bamler R. Doppler Frequency Estimation and the Cramer–Rao Bound // Trans. on GRS. May, 1991. V. 29. No. 3. P. 385-390.
  251. Barbarossa S., Levrini G. An Antenna Pattern Synthetic Technique For Spaceborne SAR Performance Optimization // IEEE Trans. on GRS. March, 1991. V. 29. No. 2. P. 254-259.
  252. Bassem M.R. MATLAB simulations for radar systems design / Bassem R. Mahafza, Atef Z. Elsherbeni, CHAPMAN & HALL/CRC Press Company. Boca Raton. London, New York, Washington, D.C. 2004.
  253. Bauma R.W., McInnes P.A. Aperture size and ambiguity constraints for a synthetic aperture radar // Synthetic Aperture Radar. J.J.Kovaly // Ed. Norwood, MA: Artech House. 1978.
  254. Baumgartner S., Rodriguez-Cassola M., Nottensteiner A., Horn R., Scheiber R., Schwerdt M. et al. Bistatic Experiment Using TerraSAR-X and DLR's new F-SAR System // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5, 2008. V. 1. P. 57-60.
  255. Benz U., Fischer J., Cöster W., Moreira A. Adaptive Compression of SAR Data // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27, 1998. P. 525-528.
  256. Benz U., Strodl K., Moreira A. Comparison of Several Algorithms for SAR Raw Data Compression // IEEE Trans. on GRS. Sept, 1995. V. 33. No. 5. P. 1266-1276.
  257. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline SAR Interferograms // IEEE Trans. on GRS. 2002. V. 40. No. 11. P. 2375-2383.
  258. Berens P. Efficient Wave Number Domain Processing for squinted Spotlight SAR // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27, 2004. P. 171-174.
  259. Bezvesilnyy O.O., Dukhpelnykova Y.V., Vinogradov V.V., Vavriv D.M. Homogeneity Criteria for Lee and Wavelet-Based Speckle Reduction Filters // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18, 2006.
  260. Blanco-Sánchez P., Duque S., Mallorqui J.J., Monells D. Analysis of Highly Non-Linear Deformations due to Mining Activity with DInSAR: PSIC4 Test Site // Proc. of Envisat Symposium 2007. Apr 23–27, 2007, ESA SP-636.
  261. Boerner E., Lord R., Mittermayer J, Bamler R. Evaluation of TerraSAR-X Spotlight Processing

## Литература

- Accuracy based on a New Spotlight Raw Data Simulator // Proc. of the IGARSS'03, IEEE, Toulouse, France. July 21–25, 2003. V. 2. P. 1323-1325.
262. *Bolle J.* Coding of SAR Raw Data // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27, 1998. P. 537-540.
263. *Braun H., Kicherer S.* External Calibration for CRS-1 and SAR-Lupe // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18, 2006.
264. *Breit H., Boerner E., Mittermayer J., Holzner J., Eineder M.* The TerraSAR-X Multi-Mode SAR Processor – Algorithms and Design // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. V. 2. P. 501-504.
265. *Breit H., Fritz T., Schättler B., Balss U., Damerow H., Schwarz E.* TerraSAR-X SAR Payload Data Processing: Results from Commissioning and Early Operational Phase // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008/ V. 1. P. 95-99.
266. *Breit H., Schättler D., Steinbrecher U.* A High Precision Workstation-Based Chirp Scaling SAR Processor. // Proc. of the IGARSS'97, IEEE, Singapore. Aug 3–8 1997. V. 1. P. 465-467.
267. *Brekke C., Weydahl D.J., Hellenen O., Olsen R.* Ship traffic monitoring using multi-polarization satellite SAR images combined with AIS reports Data // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5, 2008. V. 1. P. 81-84.
268. *Brule L., Baeggli H., MacDonald.* Radarsat-2 Program Update // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6 2002. P. 25-28.
269. *Buades A., Coll B., Morel J.M.* A review of image denoising algorithms, with a new one // Multiscale Modeling and Simulation. 2005. V. 4. No. 2. P. 490-530.
270. *Cafforis C., Prati C., Rocca F.* «SAR Data Focusing Using Seismic Migration Techniques» // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems. March 1991. V. 27. No. 2. P. 194-206.
271. *Callaghan G.D., Longstaff I.D.* Wide-swath space-borne SAR using a quad element array // IEEE Proc. Radar Sonar and Navigation. June 1999. V. 146. No. 3. P. 159-165.
272. *Carin L., Geng N., McClure M., Sichina J., Lam Nguyen.* Ultra-wide-band synthetic-aperture radar for mine-field detection // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1999. V. 41. No. 1. P. 18-33.
273. *Carrão H., Sarmiento P., Araújo A., Caetano M.* Separability Analysis of Land Cover Classes at Regional Scale: A Comparative Study of MERIS and MODIS Data // Proc. of Envisat Symposium. Apr 23–27 2007, ESA SP-636.
274. *Carrara W.G., Goodman R.S., Majeovski R.M.* Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms. Boston, London, Artech House. 1995. P. 554.
275. *Casu F., Manzo M., Pepe A. et al.* On the Capability of the SBAS-DInSAR Technique to Investigate Deformation Phenomena of Large Areas with Low Resolution Data // Proc. of Envisat Symposium. Apr 23–27 2007. ESA SP-636.
276. *Caves R., Luscombe A.P., Lee P.F., James K.* Topographic performance evaluation of the RADARSAT-2/3 tandem mission / Proc. of IGARSS'02, IEEE, Houston, USA. June 24–28 2002. V. 2. P. 961-963.
277. *Cerutti-Maori D., Gierull C.H., Ender J.H.G.* First experimental demonstration of GMTI improvement through antenna switching // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5, 2008. V. 1, pp.47-50.
278. *Çetin M., Karl W., Castañon D.* Features Enhancement and ATR Performance Using Nonquadratic Optimization-Based SAR Imaging // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems. Oct. 2003. V. 39. No. 4. P. 1375-1395.
279. *Chan H.L., Yeo T.S.* Noniterative Quality Phase-Gradient Auto-Focus (QPGA) Algorithm for Spotlight SAR Imagery // IEEE Trans. on GRS. Sept. 1998. V. 36. No. 5. Pt. 2. P. 1531-1539.
280. *Chang C.Y., Curlander J.C.* Attitude steering for Space based synthetic aperture radars // Proc. of IGARSS'92, IEEE, Toronto, Canada. May 26–29. P. 297-301.
281. *Chang Yu., Zhao F., Zhang J., Hong F.-W., Li P., Yun J.* Numerical simulation of internal waves excited by a submarine moving in the two-layer stratified fluid // Proc. of the Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. V. 18, Issue 3, Supplement 1. July, 2006. P. 330-336. <http://www.sciencedirect.com/science>.



## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

282. *Cherniakov M., Antoniou M., Saini R., Zuo R., Edwards J.*, Space-Surface BSAR – Analytical and Experimental Study // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18, 2006.
283. *Chong J., Zhu M., Dong G.* Ship Target Segmentation of High Resolution SAR Images // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6, 2002, pp.693-696.
284. *Cimino J., Elachi C., Settle M.* SIR-B. The Second Shuttle Imaging Radar Experiment // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. July, 1986. V. GE-24. No. 4. P. 445-452.
285. *Cloude S.R., Papathanassiou K.P.* Polarimetric SAR Interferometry // IEEE Trans.on GRS. 1998. V. 36. No. 5. P.1551-1565.
286. Compact radial power combiner teams up a dozen power GaAs FETs // Microwaves. Oct 1, 1977. V. 16. No. 10. P. 8-9.
287. *Cote S., Srivasfava S., Le Dantec P., Hawkins B.* From Commissioning to Extended Mission: 9 Years of Maintaining RADARSAT-1 Image Quality Performance // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
288. *Cote S., Srivasfava S., Le Dantec P., Lukowski T., Hawkins R.* Monitoring RADARSAT-1 Elevation Beam Pattern using the Canadian Boreal Forest: an Experiment // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006.
289. *Cumming I.* Model Based Doppler Estimation for Frame-Based SAR Processing // Proc. of EUSAR'01, IEEE, Sydney, Australia. July 9–13 2001. V. 6. P. 2645-2647.
290. *Cumming I.G., Wong F.W.* Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithm and Implementation, Artech House. 2005.
291. *Curlander J.C., McDonough R.N.* Synthetic Aperture Radar. New York: Wiley and Sons. 1991.
292. *Cutrona L.J., Vivian W.E., Leith E.N., Hall G.O.* A High Resolution Radar Combat-Surveillance System // IRE Trans. on Military Electronics. Apr. 1961. V. MIL-6. P. 127-131.
293. *Del Frate F., Petrocchi P., Lichtenegger J., Calabresi G.* Neural Networks for Oil Spill Detection Using ERS-SAR Data // IEEE Trans. on GRS. Sept, 2000. V. 38. No. 5. P. 2282-2287.
294. *Desai N., Kumar S., Vachhani J., Gujrati V.* Advanced Onboard technologies for ISRO's RISAT-1 follow on L-Band Polarimetric SAR mission // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. V. 1. P. 15-18.
295. *Dong G., Chong J., Zhu M.* Research on Some Problems about SAR Radiometric Resolution // Proc. of EUSAR'2004 Conference, Ulm, Germany. May 25–27 2004. V. 1. P. 701-704.
296. *Dostovalov M.Y., Ivanov A.Yu., Pereslegin S.V.* Retrieval of Current Velocity Field Using the ERS SAR Raw Data // Proc. of ERS–Envisat Symposium, Gothenburg. Oct. 2000.
297. *Durand J.M., Gimonet B.J., Perbos J.R.* SAR Data Filtering for Classification // IEEE Trans. on GRS. 1987. V. GE-25. No. 5. P. 629-637.
298. *Efimov V.B., Kurekin A.S., Sytnik O.V.* Two-Regime Radar // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 673-677.
299. *Elizavetin I.V.* Improving of SAR Stereo Correlator Performance using GTOPO30 Elevation Map // Proc. of EUSAR'2004 Conference, Ulm, Germany. May 25–27 2004. V. 2. P. 973-976.
300. *Elizavetin I.V.* The Ground Surface Backscattering Modeling Using Integral Equation Model // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27 1998. P. 153-156.
301. *Elsakov V.V., Shanov V.M.* Ecosystem Monitoring Development in the Russian Tundra Based on SAR/ERS Data // Proc. of Envisat Symposium. Apr 23–27 2007. ESA SP-636.
302. *Ender J.H.G., Cerutti-Maori D.* Position Estimation of Moving Vehicles for Space-based Multi-channel SAR/MTI Systems // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18, 2006.
303. *Espete T., Walterscheid I., Brenner A., Klare J., Gierull C., Ender J.* Progress of Hybrid Bistatic SAR: Synchronization Experiments and First Imaging Results // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. P. 217-220.
304. European Telecommunications Standarts Institute (ETSI) EN 302 066–1 v1.2.1 (2007-05); ETSI EN 302 066–2 v1.2.1 (2007-05).
305. *Faure P.F., Adrian V., Phalippou L.* Programmable Chirp Generator for SAR and Altimeters // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27 1998. P. 233-236.
306. Federal Communication Commission USA (FCC) 02-48, ET Docket 98–153, First Report and

## Литература

- Order. Apr. 2002.
307. Federal Communication Commission USA (FCC) 04-285, ET Docket 98-153, Second Report and Order and Second Memorandum Opinion and Order. Dec, 2004.
308. *Fischer C., Heer C., Krieger G., Werninghaus R.* A high resolution wide swath SAR // Proc. of EUSAR'2006 Conference, Dresden, Germany. May 16-18, 2006.
309. *Flam R.P., MacGaham J.P.* Radial power combiner for solid-state power amplifier. // MM-92 conference proceedings. Oct, 1992. P. 23-34.
310. *Freeman A.* On Ambiguity in SAR Design // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16-18, 2006. P. 697-700.
311. *Freeman A.* SAR Calibration. An overview // IEEE Trans. on GRS. Nov, 1992. V. 30. No. 6. P. 1107-1121.
312. *Freeman A., Johnson W.T.K., Huneycutt B., Jordan R., Hensley S., Siqueira P., Curlander J.* The "Myth" of the Minimum SAR Antenna Area Constraint // Proc. of IGARSS'99, IEEE, Hamburg, Germany. June 28 - July 02 1999. V. 3. P. 1770-1772.
313. *Freeman A., Johnson W.T.K., Huneycutt B., Jordan R., Hensley S., Siqueira P. and Curlander J.:* The "Myth" of the Minimum SAR Antenna Area Constraints // IEEE Trans. on GRS. Jan. 2000. V. 38. P. 320-324.
314. *Freeman A., Moghaddam M., Zink M., Zebker H.* Radiometric Correction of SAR Images of Varying Terrain Heights // Proc. of IGARSS'92, IEEE Toronto, Canada. May 26-29 1992. V. 1. pp.271-273.
315. *Frey O., Meier E., Nuesch D., Roth A.* Geometric Error Budget Analysis for TerraSAR-X // Proc. of EUSAR'2004 Conference, Ulm, Germany. May 25-27 2004. V. 2. P. 513-515.
316. *Frick H., Palsetia M., Carande R., Curlander J.* COTS SAR Ground Processing for PALSAR application. // Proc. of EUSAR'2000, Munich, Germany. May 23-25 2000. P. 729-731.
317. *Frieder H., Krieger G., Werner M., Reiniger K., Eineder M., D'Amico S., Erhardt D., Wickler M.* TanDEM-X Mission Design and Data Acquisition Plan // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2-5 2008. V. 4. P. 43-46.
318. *Fritz T., Breit H., Schättler B., Balss U., Lachaise M., Eineder M.* TerraSAR-X Image Products: Characterization and Verification // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2-5 2008. P. 99-102.
319. *Frost V.S.* Probability of Error and Radiometric Resolution for Target Discrimination in Radar Images // IEEE Trans. on GRS. 1984. V. GE-22. No. 2, 1984. P. 121-125.
320. *Frost V.S., Stiles J.A., Shanmugan K.S. and Holtzman J.C.* A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. March, 1982. V. PAMI-4. No. 2. P. 157-166.
321. *Fujimura T., Kimura T.* Compact Polarimetric Observation using Phased Array Antenna and Its Case Study for PALSAR // Proc. EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2-5, 2008. P. 37-40.
322. *Fujimura T., Kimura T., Miyauchi M., Ito M.* The Control Technique of ALOS PALSAR // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25-27, 2004. V. 2. P. 611-614.
323. *Gafforio C., Guccione P., Guarneri A.M.* Doppler centroid estimation for ScanSAR data // IEEE Trans. on GRS. 2004. V. 42. No. 1. P. 14-23.
324. *Gatelli F., Guarnieri A.M., Parizzi F., Pasquali P., Prati C., Rocca F.* The Wavenumber Shift in SAR Interferometry // IEEE Trans. on GRS. July, 1994. V. 32. No. 4. P. 855-865.
325. *Gebert N., Krieger G., Moreira A.* High Resolution Wide Swath SAR Image with Digital Beamforming - Performance Analysis, Optimization, System Design // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. 2006.
326. *Gebert N., Krieger G., Moreira A.* High Resolution Wide Swath SAR Imaging-System Performance and Influence of Perturbations // Proc. of International radar symposium IRS'05, Berlin. Sept 8, 2005. P. 49-54.
327. *Gebert N., Krieger G., Moreira A.* Multi-Channel ScanSAR for High-Resolution Ultra-Wide-Swath imaging // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. 2008. P. 79-81.

328. *Gebert N., Krieger G., Moreira A.* SAR Signal Reconstruction from Non-Uniform Displaced Phase Centre Sampling in the Presence of Perturbations // IGARSS'05, IEEE. 2005. P. 1034-1037.
329. *Gebhardt U., Loffeld O., Nies H., Natroshvili K., Ender J.* Bistatic Airborne / Space Borne Hybrid Experiment: Simulation and Analysis // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006. 2006.
330. *Girard R., Lee P.F., James K.* The RADARSAT-2&3 Topographic Mission: An Overview // Proc. of IGARSS'02, IEEE, Houston, USA. June 24–28 2002. V. 3. P. 1477-1479.
331. *Gray A.* Multisensor Aerospace-Ground Joint Interoperability ISR Coalition Architecture (MAJIC) // Military Radar 2006 Conference. London, England. Oct. 24–25 2006.
332. *Greenberg J.S.* A system look at satellite-borne high resolution radar // RCA Rev. Dec. 1967. V. 28. No. 4. P. 679-709.
333. *Grenier C., Barnard I., Arsenault P.* The Radarsat-2 Synthetic Aperture Radar Phased Array Antenna Performance Analysis Methodology // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 117-120.
334. *Grenier C., Barnard I., Arsenault P.* The Radarsat-2 Synthetic Aperture Radar Phased Array Antenna Hardware Modeling and Analysis (System Approach) // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 665-668.
335. *Griffith D.A.* SAR/MTI Military Radar Application for Civilian Use // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27 1998. P. 291-294.
336. *Guarneri A.M., Giudici D.* Accurate Estimate of the Azimuth Antenna Pattern from SAR Images // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
337. *Guarneri A.M.* Adaptive Removal of Azimuth Ambiguities in SAR Images // IEEE Trans. on GRS. March 2005. V. 43. No. 3. P. 625-633.
338. *Guarneri A.M.* Space-Adaptive Ambiguity Suppression in SAR Images // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27, 2004. P. 187-190.
339. *Guillaso S., Reigber A., Ferro-Famil L., Pottier E.* Range Resolution Improvement of Airborne SAR Images // IEEE Trans. on GRS Letters. Jan. 2006. V. 3. No. 1. P. 135-139.
340. TerraSAR-X: Mission, Calibration and First Results. Special issue // IEEE Trans. on GRS. Feb. 2010. V. 48. No. 2.
341. *Hackenberg U., Adolph M., Dreher H., Ott H., Reber R., Rieger R., Schweizer.* T/R Module for Synthetic Aperture Radar with Polarisation Agility // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. V. 2. P. 477-480.
342. *Hajnsek I., Papathanassiou K.P., Moreira A., Cloude S.R.* The Potential of Surface Parameter Estimation from Interferometric SAR // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6, 2002. P. 275-278.
343. *Hawkins R.K.* et al. Operational calibration of spaceborne SAR: The Radarsat experience // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27, 1998. P. 213-216.
344. *Hayashi N., Motoyuki, Sato N.* Bistatic 3D subsurface radar imaging // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. P. 155-158.
345. *Haykin S.* Neural Networks. A Comprehensive Foundation. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 1999. 824 pp.
346. *Heer Ch., Link Ju.* The Light SAR X-band sensor design and performance // Proceedings // of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27 1998. P. 79-81.
347. *Henrion S., Savy L., Planès J.G.* New results for Spaceborne Hybrid Strip-map/Spotlight SAR High Resolution Processing // Proc. of IGARSS'99, IEEE, Hamburg, Germany. June 28 – July 2 1999. V. 1. P. 530-551.
348. *Henrion S., Savy L., Planès J-G.* Properties of hybrid Strip-Map / Spotlight Spaceborne SAR processing // Proc. of IGARSS'99, IEEE, Hamburg, Germany. June 28 – July 2. 1999. V. 1. P. 530-534.
349. *Herskovitz D.* Wide, Wider, Widest // Journal of Electronic Defense. July 1995. P. 50-57.
350. *Hoogeboom P.* NATO's Air To Ground Surveillance Programme (AGS): Providing The Technology. // Military Radar 2006 Conference. London, England. Oct. 24–25 2006.

## Литература

351. *Hounam D., Mittermayer J.* Techniques for Reducing SAR Antenna Size // Proc. of IGARSS'03, IEEE, Toulouse, France. July 21–25 2003. V. 3. P. 2143-2145.
352. *Hounam D., Moreira A., Mittermayer J., Kriger G., Small A.* Low-Cost SAR Satellite for InSAR Measurements of Permanent Scatterers // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 49-52.
353. *Hubert M.J.* Airborne SAR imaging along a circular trajectory // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006.
354. *Hussain, Malek G.M.* Ultra-wideband impulse radar. An overview of principles // Aerospace Electronics Systems Magazine. IEEE Magazine. 1998. V. 13. No. 9. P. 9-14.
355. *Janaswamy R.* An accurate moment method model for the tapered slot antenna // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. Dec. 1989. No. 12. P. 1523-1528.
356. *Janaswamy R. and Schaubert D.H.* Analysis of the tapered slot antenna // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1987. No. 9. P. 1058-1065.
357. *Jin M.Y.* High Quality Spotlight SAR Processing Algorithm Designed for LightSAR Mission // Proc. of IGARSS'97, IEEE, Singapore. Aug 3–8 1997. V. 29. P. 477-480.
358. *Johansen E.L.* Top-Hat Reflectors Cap Radar Calibration // Microwave. Dec. 1984. P. 65-66.
359. *Jolliffe I.T.* Principal Component Analysis. New York: Springer-Verlag. 1986.
360. *\*Kalinkevich A., Kutuza B., Pliushchev V., Druchinin S.* Possibilities of Use of Multi-Frequency SAR for Subsurface Sensing of the Earth // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6 2002. P. 481-484.
361. *Keller J.B., Munk W.H.* Internal wave wakes of a body moving in a stratified fluids // Phys. Fluids 13 (1970). 1970. P. 1425-1431.
362. *Kent S., Uçan O.N., Ensari T.* Speckle Reduction of Synthetic Aperture Radar Images Using Wavelet Filtering // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 1001-1004.
363. *Kervrann C., Boulanger J., Coupé P.* Bayesian Non-Local Means Filter, Image Redundancy and Adaptive Dictionaries for Noise Removal // Proc. Conf. Scale-Space and Variational Meth. (SSVM'07), Ischia, Italy. 2007.
364. *Keydel W.* Considerations towards the Future of Space-borne SAR Systems // Proc. of URSI GA'2005, New Delhi, India. 2005.
365. *Knight A., Ludwig M., Vogel P., Gallou N.* High Power L-band T/R Module for Spaceborne SAR // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
366. *Kohonen T.* Self-Organizing Maps. Series in Information Science. Springer, Heidelberg. 1995. V. 20.
367. *Kovalenko A.* Method of Selective One-Dimensional Azimuth Ambiguity Reduction for High Resolution SAR // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 02–05 2008. V. 3. P. 355-358.
368. *Kovalenko A., Riman V.* Reduction of Azimuth Ambiguities in High Resolution Spaceborne SAR Systems by Methods Of Differential Synthesizing of the Antenna's Aperture (DifSAR) // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 697-700.
369. *Krawczyk A., Perski Z., Hanssen R.* Application of ASAR Interferometry for Motorway Deformation Monitoring // Proc. of ENVISAT Symposium, Montreux, Switzerland. Apr 23–27 2007 (ESA SP-636, July, 2007, 507735kr.pdf).
370. *Krieger G., Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Zink M., Werner M.* TanDEM-X: Mission Concept, Product Definition and Performance Prediction // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
371. *Krieger G., Gerbert N., Younis M., Bordonni F., Potyuchenko A., Moreira A.* Advanced Concept for Ultra-Wide-Swath Imaging // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. V. 2. P. 31-34.
372. *Krieger G., Moreira A., Fiedler H., Hajnsek I., Zink M., Werner M., Eineder M.* TanDEM-X: Mission Concept, Product Definition and Performance Prediction // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
373. *Kuan D.T., Sawchuk A.A., Strand T.C., Chavel P.* Adaptive restoration of images with speckle // IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing. March 1987. V. 35. No. 3. P. 373-383.
374. *\*Kutuza B., Kalinkevich A., Shishkova O., Plushev V., Hajnsek I.* Quantitative Estimation of Sub-

- surface Parameters Using Polarimetric C- and VHF-band SAR Data // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27, 2004. P. 653-656.
375. \*Kutuza B., Kalinkevich A., Vostrov E., Dzenkevich A., Plushchev V., Koshevarov G., Manakov V., Melnikov L., Porohov I. Some Investigation of Subsurface Hydrological Soil Regime Using Multi-Frequency Polarimetric // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6 2002. P. 125-128.
376. Lambers M. Adaptive Dynamic Range Reduction for SAR Images // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. P. 371-374.
377. Lavelle M., Solimini D., Pottier E., Desnos Y.-L. Investigation the Performance of Compact Polarimetry in SAR Interferometry // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. P. 45-48.
378. Lavrova O., Shcherbak S., Mityagina M., Pyrkov V. Case study: Use of SAR Data for the Operational Control of Fishing Ships Positioning // Proc. of Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland. Apr 23–27 2007 (ESA SP-636, July, 2007, 462036la.pdf).
379. Lee J.-S. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images // Optical Engineering. 1986. V. 25. No. 5. P. 636-645.
380. Lee J.-S. Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. March, 1980. V. PAMI-2. No. 2. P.165-168.
381. Lee J.-S. Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics // Computer Graphic and Image Processing. 1981. P. 380-389.
382. Lee J.-S., Grunes M.R., Ainsworth T.L., Schuler D.L. Speckle Filtering of Polarimetric SAR Interferometry Data for Forest Applications // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6 2002. P. 271-273.
383. Lee J.-S., Wen J.-H., Ainsworth T.L., Chen K.-S., Chen A.J. Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery // IEEE Trans. on GRS. Jan, 2009. V. 47. No. 1. P. 202-213.
384. Letsch K., Berens P. Improved PSLR Estimation from SAR Images by Consideration of the Clutter Background // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
385. Levy-Natansohn R. Overview of the TecSAR Satellite Modes of Operation // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
386. Li F.K., Bryan M.L. Tradeoffs Among Several Synthetic Aperture Radar Image Quality Parameters. Results of a User Survey Study // Photogram. Eng. and Remote Sensing. June 1983. V. 49. No. 6. P. 791-803.
387. Li F.K., Johnson W.T.K. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar systems // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems. May 1983. V. 19. P. 389-397.
388. LightSAR preliminary phase A study. Jet Propulsion Lab. 1996.
389. Lim C., Soon Y. Non-iterative spotlight SAR autofocusing using a modified phase gradient approach // IEEE Trans. on GRS. 1997.
390. Liu J., Kuga Y., Ishimaru A., Pi X., Freeman A. Ionospheric Effects on SAR Imaging: A Numerical Study // IEEE Trans. on GRS. 2003. V. 41. No. 5. P. 939-947.
391. Lloyd D., Longstaff L.D. Ultra-Wideband Multi-Static SAR for the Detection and Location of Landmines // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6 2002. P. 53-56.
392. Loffeld O., Nies H., Peters V., Knedlik S. Models and Useful Relations for Bistatic SAR Processing // IEEE Trans. on GRS. Oct, 2004. V. 42. P. 2031-2038.
393. Lopes A., Nezry E., Touzi R., Laur H. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images // International Journal of Remote Sensing. 1993. V. 14. No. 9. P. 1735-1758.
394. Lopes A., Touzi R., Nezry E. Adaptive speckle filters and Scene heterogeneity // IEEE Trans. on GRS. Nov, 1990. V. 28. No. 6. P. 992-1000.
395. López-Martínez C., Cánovas X.F. Interferometric Phase Speckle Reduction Using Wavelet Transform // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6, 2002. P. 593-596.
396. Lyzenga D.R., Shuchmann R.A., Walker J.L. Measurement of Ocean Surface Currents by Synthetic Aperture Radar // Proc. of IGARSS'82, IEEE. 1982. V. 1. P. 71-76.

## Литература

397. *Mancell C.E., Swiger J.M.* A Map Drift Auto-focus Technique for Correcting Higher Order SAR Phase Errors // 27<sup>th</sup> Annual Tri-Service Radar Symposium Record, Monterey, CA. June 23–25, 1981. P. 391-400.
398. *Martisec D., Goldstein R.* Bistatic Radar Experiment // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27, 1998. P. 31-34.
399. *Matew C.H., Burbidge G.T.A.* TerraSAR L-band SAR System Component. Design and Status // Proc. of EUSAR'2000, Munich, Germany. May 23–25 2000. P. 37-40.
400. *Meer P., Park R.-H., Cho K.* Multiresolution adaptive image smoothing // Graphical Models and Image Processing. 1994. V. 56. No. 2. P. 140-148.
401. *Mehlis J.G.* Synthetic Aperture Radar range-azimuth design and constraints // IEEE Int. Radar Conf. 1980. P. 143-152.
402. *Meisl P., Tompson A.A., Luscombe A.P.* Radarsat-2 Overview and Development Status // Proc. of EUSAR'2000, Munich, Germany. May 23–25 2000. P. 373-376.
403. MIMO Radar signal processing. Edited by Jian Li, Peter Stoica. Wiley. A John Wiley & Sons, Inc. Publication. New Jersey. 2009. 448 p.
404. *Min K., Willis M.* Dens Media Penetrating Radar. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 3. Edited by Carl E. Baum, Lawrence Carin and Alexander P. Stone // Plenum Press, New York. 1997. P.423.
405. *Misra T., Rana S.S., Bora V.H., Desai N.M., Rao C.V.N., Jyothi R.* SAR Payload of Radar Imaging Satellite (RISAT) of ISRO // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006.
406. *Misra T., Rana S.S., Shankara K.N.* Synthetic aperture radar payload of Radar imaging satellite (RISAT) of ISRO // Proc. of URSI GA'2005, New Delhi, India. 2005.
407. *Misra T., Rana S.S., Shankara K.N.* Synthetic Aperture Radar Payload of Radar Imaging Satellite (RISAT) of ISRO // Proc. of URSI GA'2005, New Delhi, India. Oct 23–29 2005.
408. *Mittermayer J., Lord R., Boerner E.* Sliding Spotlight SAR Processing for TerraSAR-X using a new formulation of the Extended Chirp Scaling Algorithm // Proc. of IGARSS'03, IEEE, Toulouse, France. 2003.
409. *Mittermayer J., Moreira A.* A Generic Formulation of the Extended Chirp Scaling Algorithm (ECS) for Phase Preserving ScanSAR and SpotSAR // Proc. of IGARSS'00, IEEE. 2000.
410. *Mittermayer J., Moreira A., Lofeld O.* Spotlight SAR Data Processing Using the Frequency Scaling Algorithm // IEEE Trans. on GRS. Sept, 1999. V. 37. No. 5.
411. *Mittermayer J., Steinbrecher U., Meta A., Tous-Ramon N., Wollstadt S., Younis M., Marquez J., Schulze D.* TerraSAR-X System Performance and Command Generation // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. P. 87-90.
412. *Mobley S.G., Maier M.W.* Synthetic aperture radar with a non-uniform pulse repetition interval // Proc. of SSST'95. 1995. P.498.
413. *Moore R.K.* Tradeoff Between Picture Element Dimensions and Noncoherent Averaging in Side-Looking Airborne Radar // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems. Sept, 1979. V. AES-15. No. 5. P. 697-708.
414. *Moore R.K., Claassen J.P.* Scanning Spaceborne Synthetic Aperture Radar with Integrated Radiometer // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems. May, 1981. V. AES-17. No. 3. P. 410-420.
415. *Mora O., Granda J., Biescas E., Urdiroz A.* TerraSAR-X high resolution SAR data: Ground motion and mapping applications for infrastructure, oil & gas and public health domain // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5, 2008. P. 31-34.
416. *Moreira A., Huang Y.* Airborne SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Approach with Integrated Motion Compensation // IEEE Trans. on GRS. Sept, 1994. V. 32. No. 5. P. 1029-1040.
417. *Moreira A.* Suppressing the Azimuth Ambiguities in Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Trans. on GRS. July, 1993. V. 31. No. 4. P. 885-895.
418. *Moreira A.* TerraSAR-X Upgrade to a Fully Polarimetric Imaging Mode // German Aerospace Center (DLR). Jan, 2003 (TerraSAR-PolinSAR-16-01-2003.pdf).

419. *Moreira A., Mittermayer J., Scheiber R.* Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes // IEEE Trans. on GRS. Sept, 1996. V. 34. No. 5. P. 1123-1136.
420. *Moreira A., Mittermayer J., Scheiber R.* Extended Chirp Scaling SAR Data Processing in Stripmap, ScanSAR and Spotlight Imaging Modes // Proc. of EUSAR'2000, Munich, Germany. 2000. P. 749-752.
421. *Munson D.C., O'Brien J.D. and Jenkins W.K.* A Tomographic Formulation of Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar // Proc. of IEEE. Feb., 1983. V. 72. No. 8. P. 254-261.
422. *Naftaly U.* TECSAR – Performance, Design and Status // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 27-30.
423. *Nathan K.S., Curlander J.S.* // Proc. of IGARSS'87, IEEE, Ann Arbor, USA. May 18–21. 1987. P. 1457-1462.
424. *Natroshevili K., Loffeld O.* Comparison of Bistatic SAR Focusing Approaches utility // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006.
425. *Natroshevili K., Loffeld O., Nies H.* Focusing of Arbitrary Bistatic SAR Configurations *Natroshevili K., Loffeld O., Nies H.* // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006.
426. *Neo Y.L., Wong F., Cumming I.* An Efficient Non-Linear Chirp Scaling Method of Focusing Bistatic SAR images // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006.
427. *\*Neronovskiy L., Osipov I., Verba V.* Modelling of Signal Transformation in Spaceborne UWB short pulse SAR // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006.
428. *\*Neronovskiy L., Osipov I., Verba V.* Modelling of Space-Frequency Filtering Method for Moving Target Indication in SAR // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. June 16–18 2006.
429. *\*Neronovskiy L.B., Koshevarov G.A., Melnikov L.Ya., Likhansky S.G.* Correction of Equipment Distortions in Data From Ekor-A1 SAR on «Almaz-1» Satellite // Proc. of EUSAR'2000, Munich, Germany. May 23–25 2000. P. 453-456.
430. *\*Neronovskiy L.B., Likhansky S.G., Elizavetin I.V., Sysenko D.V.* Phase History Model Adapted to the Spaceborne SAR Survey // IEE Proceedings, Radar, Sonar & Navigation. June 2003. V. 150. No. 3. P. 184-192.
431. *\*Neronovskiy L.B., Likhansky S.G., Lipatov A.A., Elizavetin I.V., Sysenko D.V.* A New Approach to the Analysis and Simulation of Image Synthesis Algorithms for Space-Based SAR Spotlight Mode // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6 2002. P. 553-556.
432. *\*Neronovskiy L., Osipov I., Turuk V., Andrianov V., Porokhov I.* Choice of Engineering Performances in Designing Multipurpose Synthetic Aperture Radar for Small Satellites // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6 2002. P. 449-452.
433. *\*Neronovskiy L.B., Verba V.S., Likhansky S.G., Pushkov D.V., Elizavetin I.V.* Phenomenological Approach to SAR Signal Processing Simulation // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 1005-1008.
434. *\*Neronovskiy L.B., Verba V.S., Osipov I.G., Pushkov D.V.* PGA Algorithm Application for Local Autofocusing of Hi-Res Spaceborne SAR Images // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. V. 2. P. 101-104.
435. *\*Neronovskiy L.B., Dostovalov M.Yu., Pereslegin S.V.* The Extended Algorithms for Doppler Centroid Estimation // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. V. 2. P. 709-712.
436. *New Views of the Earth. Scientific Achievements of ERS-1.* European Space Agency. Gilford, UK: ESYs Ltd. 1995. P.162.
437. *Odoux B., Deschoux–Beaume M., Planes J.G., Lambert–Nebout C., Adragna F.* SAR Raw Data On-Board Compression with Frequency Filtering // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27 1998. P. 521-524.
438. *Olsen O.M.* Wide swath single look complex product for ENVISAT ASAR // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
439. *\*Osipov I.G., Neronovskiy L.B., Andrianov V.I., Verba V.S., Kozlov K.V., Kurenkov V.N., Pushkov D.V.* Calculated Performance of SAR for High Orbit Spacecraft Using Nuclear Power Supply // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.

## Литература

440. \*Osipov I.G., Neronskiy L.B., Turuk V.E., Andrianov V.I., Verba V.S., Korolev A.V., Kulikovskiy M.G., Pushkov D.V., Janushevskiy G.D., Feyzulla N.M., Panteleev V.A. Synthetic Aperture Radar for Earth and Sea Surface Observations // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. V. 1. P. 59-62.
441. Ossovskaya A., Kym J.H., Wiesbek W. Simulation of High-Resolution Wide-Swath SAR // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. 2006.
442. Patent USA #5,745,069. Reduction of Radar Antenna Area / Gail W.B. Apr 28 1998.
443. Pelizzari A., Buckreuss S., Eineder M. Measurement and Compensation of a Calibrated Tone in the X-SAR Signal // Proc. of EUSAR'2000, Munich, Germany. May 23–25 2000. P. 255-227.
444. Pierson W.J., Moskowitz Z.A. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii // J. Oceanogr. Res. 1964. V. 69. P. 5181-5190.
445. Porcello et al. The Apollo Lunar Sounder Radar System // Proc. of the IEEE. June 1974.
446. Potts D.L. LightSAR Reference Mission. JPL, California Institute of Technology. March 1998. JPL D-13946.
447. Radarsat. Special issue. Canadian Journal of Remote Sensing. Nov–Dec. 1993. V. 19. No. 4.
448. Radial combiner runs circles around hybrids // Microwaves. Nov. 1980. V. 19. No. 11. P. 55-58.
449. Radius A., Marques P. A Novel Methodology for Full Velocity Vector Estimation of Ships Using SAR Data // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. V. 3. P. 93-96.
450. Raney R.K., Freeman A., Hawkins R.W., Bamler R. A Plea for Radar Brightness // Proc. of IGARSS'94, IEEE. 1994. P. 1385-1387.
451. Raney R.K., Runge H., Bamler R., Cumming I., Wong F. Precision SAR Processing without Interpolation for Range Cell Migration Correction // IEEE Trans. on GRS. July, 1994. V. 32. No. 4.
452. RF Microdevices. Technical notes and articles. AN 0001.
453. Rieger R., Schweizer B., Dreher H., Reber R., Adolph M., Feldle H.-P. Highly Integrated Cost-Effective Standard X-Band T/R Module Using LTCC Housing Concept for Automated Production // Proc. of EUSAR'2000, Munich, Germany. May 23–25 2000. P. 303-306.
454. Rihaczek A.W. Principles of High Resolution Radar. N.-Y.: McGraw-Hill Inc. 1969.
455. Rothwell E.J., Chen K.M., Nyquist D.P., Ross J.E. Time-Domain Imaging of Airborne Targets using Ultra-Wideband or Short-Pulse Radar // IEEE Trans. on Antenna and Propagation. March 1995. V. 43. No. 3. P. 327-329.
456. Sabour S.V., Lohman P., Soergel U. Monitoring Agricultural Activities Using ASAR Envisat Data // Proc. of Envisat Symposium. Apr 23–27 2007. ESA SP-636.
457. Sanders R.J. Component advances open new doors for radar designers // MSN. March 1989. V. 19. No. 3. P. 15-21.
458. Sandwell, David T. The Gravity Field of the Earth. 2002. Pt. 1. [http://topex.ucsd.edu/geodynamics/14gravity1\\_1.pdf](http://topex.ucsd.edu/geodynamics/14gravity1_1.pdf).
459. Sanyuan X., Wang J., Xiaoling Zhang X. Time-Varying R-D Algorithm for High Squint SAR Imaging // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
460. SAR Data Products Format Standard. CEOS. CEOS SAR Data Standards Subgroup. Rev.2.0, 10.03.1988.
461. Sato M., Takahashi K. 3D subsurface SAR for humanitarian demining // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. P. 151-154.
462. Schaefer C., Fischer C., Volker M. One-bit Digitization for DBF-SAR: Too Good to be True. // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. V. 1. P. 23–26.
463. Schaefer C., Henrichs A., Krahn E., Hantzsch M. Computation of Optimal Quantizers for Wavelet-Based SAR Raw Data Compression // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25–27 1998. P. 531-536.
464. Schättler B. et al. Preliminary Design of the TerraSAR-X Payload Ground Segment Advanced SAR and CEOS WGCV SAR Workshop, St.Hubert, Canada. June, 2003.
465. Schneider R.Z., Fernandes D. Entropy Concept for Change Detection in Multitemporal SAR Images // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4–6 2002. P. 221–224.



466. *Shimada M.* Radiometric Correction of Saturated SAR Data // IEEE Trans. on GRS. Jan 1999. V. 37. No. 1. Pt. II. P. 467-478.
467. *Shimada M., Watanabe M., Rosenqvist A., Ito N.* ALOS and PALSAR Initial Calibration Status // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16-18 2006.
468. \**Shteinsleiger V.B., Dzenkevich A.V., Manakov V.Yu., Melnikov L.Ya., Mizezhnikov G.S.* Two dimensional Adaptive Compensation for Ionosphere Destructive Effect on Resolution of VHF Spaceborne SAR // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25-27 1998. P. 157-162.
469. *Siqueira P., Freeman T.* Source Ambiguities for Imaging and Interferometric SAR // Proc. of IGARSS'98, IEEE. 1998.
470. *Solberg A., Brekke B., Husøy P.O.* Oil Spill Detection in Radarsat and Envisat SAR Images // IEEE Trans. on GRS. March 2007. V. 45. No. 3. P. 746-755.
471. *Souyris J.-C., Fjortoft R., Mingot S., Lee J., Lee J.-S.* Compact Polarimetry Based on Symmetry Properties of Geophysical Media: The  $\pi/4$  Mode // IEEE Trans. on GRS. March 2005. No. 3. P. 643-646.
472. Soviet Radar Satellite Shows Potential to Detect Submarines // Aviation Week & Space Technology. Oct. 8 1990. P. 22-23.
473. *Pillai S.U., Ke Young Li, Himed B.* Mc Graw Hill. Space Based Radar. Theory & Applications. 2008.
474. Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Current Status and Future Directions // NASA Technical Memorandum 4679, NASA. Apr. 1995.
475. *Stankwitz H.C., Dallaire R.J. and Fineup J.R.* Nonlinear Apodization for Sidelobe Control in SAR Imagery // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems. Jan. 1995. V. 31. No. 1. P. 267-279.
476. *Strodl K., Benz U., Blaser, F., Eiting T., Moreira A.* A comparison of several algorithms for on-board SAR raw data reduction // Proc. of IGARSS'94, IEEE. Aug 8-12, 1994. V. 4. P. 2197-2199.
477. *Strong R.* Radar: The Evolution Since World War II. Historical Electronics Museum // IEEE A&E systems magazine. Jan. 2005. P. 19-24.
478. *Strozzi T., Wegmüller U., Werner C., Wiesman A.* Surface Velocity of Swiss Alpine Glaciers from ERS SAR Interferometry Data // Proc. of Envisat Symposium. Apr 23-27 2007. ESA SP-636.
479. *Suchail J.-L., Buck C., Guijarro J., Schönenberger A., Torres R.* The Envisat ASAR Instrument // Proc. of EUSAR'2000, Munich, Germany. May 23-25 2000. P. 33-36.
480. *Suess M., Grafmueller B., Zahn R.* A Novel High Resolution, Wide Swath SAR System // Proc. of IGARSS'2001, IEEE, Sydney, Australia. July 9-13 2001. V. 3. P. 1013-1015.
481. *Suess M., Riegger S., Pitz W., Werninghaus R.* TerraSAR X – Design and Performance // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4-6 2002. P. 49-52.
482. *Suess M., Völker M.* Superresolution Range Resolution Improvement by Coherent Combination of Repeat Pass SAR Images // Proc. of EUSAR'1998, Friedrichshafen, Germany. May 25-27 1998. P. 565-570.
483. *Suess M., Zubler M., Zahn R.* Performance Investigation on the High Resolution, Wide Swath SAR System // Proc. of EUSAR'2002, Cologne, Germany. June 4-6 2002. P. 187-190.
484. *Sullivan R.J.* Microwave Radar. Imaging and Advanced Concepts // Artech House. 2000.
485. *Sveinsson J.R., Atli Benediktsson J.A.* Tree Structured Filter Banks for Speckle Reduction of SAR Images // Proc. of IGARSS'97, IEEE, Sydney, Australia. July 9-13 2001. V. 3. P. 1013-1015.
486. *Systemko V., Elizavetin I.* Comparative analysis of the spotlight SAR algorithms for ground processing facility // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25-27 2004. P. 687-690.
487. *Tello M., Lopez-Martinez C., Mallorqui J.J.* Ship Detection in SAR Imagery based on the Wavelet Transform // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25-27 2004. V. 2. P. 965-968.
488. *Torres R., Simpson D.* The TerraSAR-L System // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25-27 2004. P. 41-44.
489. *Touzi R., Raney R.K., Charbonneau F.* On the Use of Permanent Symmetric Scatterers for Ship Characterization // IEEE Trans. on GRS. 2004. V. 42. No. 10. P. 2039-2045.

## Литература

490. *Vachon P.V., Raney R.K.* Estimation of the SAR System Transfer Function Trough Processor Defocus // IEEE Trans. on GRS. Nov. 1989. V. 27. No. 6. P. 702-708.
491. *Van den Broek A.C., Smith A.J.E., Dekker R.J., Steeghs T.P.H.* Target Acquisition Performace as a Function of Resolution using Radar Change Detection // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006. P. 795–798.
492. *Van Slyke R.* Converting COTS Systems For Military Necessity from the Tail End to the Front End of the Obsolescence Curve: A Case Study // Military Radar 2006 Conference, London. Oct. 24–25 2006.
493. *\*Verba V., Neronskiy L., Osipov I.* Russian Spaceborne Imaging Radars: Scientific and Technical Achievements // Proc. of URSI GA'2005, New Delhi, India. Oct 23–29 2005.
494. *Vidal-Pantelioni A., Marti D., Ferrando M.* Adaptive multiresolution method for speckle noise reduction in synthetic aperture radar images // Proc. of IGARSS'99, IEEE, Hamburg, Germany. June 28 – July 2 1999. V. 2. P. 1325-1327.
495. *Vollmer E. and Hinken J.H.* Synthesis method for broad-band tapered wire antennas and its experimental verification // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1989. V. 37. No. 8. P. 959-965.
496. *Vuolevi J., Rahkonen T.* Distortion in RF Power Amplifiers. Artech House, inc. 2003.
497. *Wahl D.E., Eichel P.H., Ghiglia D.C., Jakowatz C.V.Jr.* Phase Gradient Auto-Focus – A Robust Tool for High Resolution SAR Phase Correction // IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems. July 1994. V. 30. No. 3. P. 827-835.
498. *Wahl M., Adolph M., Biller K., Hackenberg U. et al.* High Precision T/R-Module for SAR Earth Observations // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
499. *Walterscheid I., Klare I., Brenner A., Ender J., Loffeld O.* Challenges of a Bistatic Spaceborne/Airborne SAR Experiment // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
500. *Wang X.* Using Satellite Yaw Technology to Avoid Blind Zones in Wide Swath High Resolution SAR // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
501. *Werninghaus R., Balzer W., Buckreus S., Mittermayer J., Mühlbauer P.* The TerraSAR-X Mission // Proc. of EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 19-22.
502. *Werninghaus W., Zerfowski I.* The TerraSARX Mission // Advanced SAR and CEOS WGCV SAR Workshop, St. Hubert, Canada. June 2003.
503. *Wong F., Cumming L.G.* A combined SAR Doppler Centroid Estimation Scheme Based upon Signal Phase // IEEE Trans. on GRS. May 1996. V. 34. No. 3. P. 696-707.
504. *Wong F.H., Yeo T.S., Tan N.L.* New Applications of Non-Linear Chirp Scaling in SAR Data Processing // Proc. of IGARSS'00, IEEE, Honolulu, USA. 2000. V. 1. P. 96-98.
505. *Xie H., Pierce L.E., Ulaby F.T.* Statistical Properties of Logarithmically Transformed Speckle // IEEE Trans. on GRS. March, 2002. V. 40. No. 3. P. 721-727.
506. *Xiong J., Yang J., Fan Y.* Analysis and Improvement of a Fast Backprojection Algorithm for Stripmap Bistatic SAR Imaging // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. P. 201-204.
507. *Yates G., Blake A.* Bistatic SAR image utility // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
508. *Yegulap A.F.* Minimum Entropy Auto-Focus, Seventh Annual Adaptive Sensor Array Processing // Workshop at Lincoln Laboratories. March 1999.
509. *Yeung R.W., Nguyen T.C.* Waves generated by a moving source in a two-layer ocean of finite depth // J. Engng. Mathematics 35 (1999). 1999. P. 85-107.
510. *Younis M., Metzig R., Krieger G., Klein R.* Performance Prediction and Verification for Bistatic SAR Synchronization Link // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
511. *Younis M., Fischer C., Wiesbeck W.* Digital Beamforming in SAR systems // IEEE Trans. on GRS. July 2003. V. 41. No. 7. P. 735-739.
512. *Yuepeng S., Ruliang Y.* High Resolution, Wide Swath Synthetic Aperture Radar Using Multiple Transmit-receive Aperture // Proc. of EUSAR'2006, Dresden, Germany. May 16–18 2006.
513. *Zakharova L.* Polarimetric coherence for land covers classification // Proc. of URSI GA'2005, New Delhi, India. 2005.

## Радиолокационные системы землеобзора космического базирования

514. *Zakharova L., Darizhapov D., Kirbizhekova I.* Study of natural objects in Transbaikalia by means of polarimetry and polarimetric interferometry // Proc. EUSAR'2004, Ulm, Germany. May 25–27 2004. P. 733-736.
515. *Zin M., Krieger G., Fiedler H., Moreira A.* The TanDEM-X Mission Concept // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. V. 4. P. 31-34.
516. *Jane's Fighting Ships 1990–1991*, Richard Sharpe. Janes Yearbook. 1990. 800 pp.
517. *Schwerdt M., Brütigam B., Bachmann M., Döring B.* TerraSAR-X Calibration Results // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5 2008. V. 1. P. 91-94.
518. *Meta A., Prats P., Steinbrecher U., Mittermayer J., Scheiber R.* TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison // Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5, 2008. V. 2. P. 277-280.
519. Спутники радиолокационного зондирования Земли // Приложение №1 на CD к Ежегоднику «Спутниковые системы связи и вещания» / Составители *Е.А. Костюк* и *А.А. Кучейко*. М.: ИПРЖ, 2001. 86 с.
520. Proc. of Envisat Symposium, Montreux, Switzerland, CD-ROM SP-636. Apr 23–27 2007.
521. Shuttle Radar Topography Mission X-SAR/SRTM. 3D view on Earth. DLR, Oberpfaffenhofen, Germany. CD-ROM, 2000. SRTM Web Site [www.dfd.dlr.de/srtm](http://www.dfd.dlr.de/srtm).
522. Spaceborne Imaging Radar. JPL. SIRCE03: Educational CD-ROM PC Special Edition With Companion World Wide. Web Site <http://southport.jpl.nasa.gov/companion>.
523. *Афраймович Э.Л., Караченцев В.А.* Погрешности функционирования спутниковых радиотехнических систем, обусловленные состоянием трансионосферного радиоканала // Электронный журнал «Исследовано в России». С. 2382-2390. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/202.pdf>.
524. Ритек-Корус. Веб-сайт <http://www.mnirti.ru/~reteckr>.
525. Веб-сайт <http://floods.ikd.kiev.ua/>.
526. Веб-сайт [http://epsilon.nought.de/tutorial/processing/sar\\_proz.pro](http://epsilon.nought.de/tutorial/processing/sar_proz.pro).
527. Веб-сайт [http://graphics.cs.msu.ru/courses/cg\\_el00/kotelnikov.pdf](http://graphics.cs.msu.ru/courses/cg_el00/kotelnikov.pdf).
528. Веб-сайт [http://www.russianspaceweb.com/Almaz-T\\_spacecraft.htm](http://www.russianspaceweb.com/Almaz-T_spacecraft.htm).
529. Веб-сайт американских ученых <http://www.fas.org/military/>.
530. Веб-сайт фирмы Infoterra. <http://www.infoterra.de/tsx/freedata/start.php>.
531. Веб-сайт фирмы Sandia National Laboratories General Atomics, США. [www.sandia.gov](http://www.sandia.gov).
532. Википедия. Свободная электронная энциклопедия. Веб-сайт [http://ru.wikipedia.org/wiki/Название\\_статьи](http://ru.wikipedia.org/wiki/Название_статьи).
533. Постоянные на эпоху 2000 года (астрономические и другие). Веб-сайт <http://astro.websib.ru/sprav/const.htm>.
534. Данные дистанционного зондирования со спутника ALOS (PALSAR). Веб-сайт Совзонд <http://www.sovzond.ru/satellites/>.
535. *Елизаветин И.В.* Технология восстановления цифровых моделей рельефа с использованием снимков космических радиолокаторов и пакета Advanced Radar Module Imagine для 8.3. DATA+. 2008, <http://www.dataplus.ru/industries/7ZOND/npomash.htm>.
536. Инженерно-технологический центр СканЭкс. Примеры снимков TerraSAR-X. Веб-сайт <http://www.scanex.ru>.
537. Карты Google. Веб-сайт <http://maps.google.com/>.
538. Каталог изображений Земли. Продукция космического аппарата «Алмаз-1». ОАО «НПО машиностроения». Веб-сайты <http://npomash.ru/activies/>, <http://almaz1.ru/>.
539. Научная аппаратура модуля 77КСИ «Природа». Веб-сайт [http://www.cosmoworld.ru/mirstation/mir/77KSE\\_devices.shtml](http://www.cosmoworld.ru/mirstation/mir/77KSE_devices.shtml).
540. *Ошейко С.В., Серых Т.А., Гершензон О.Н.* Оперативный мониторинг утечек и разливов нефти в морских акваториях // ИТС «Скан-Экс». Ноябрь 2007 г. <http://www.scanex.ru/ru/publications/pdf>.
541. Программный пакет Envi 4.6, ИТТ. Веб-сайт <http://www.ittvis.com/envi>.
542. Программный пакет Radar Mapping Suite ERDAS Imagine фирмы Leica. Веб-сайт <http://www.dataplus.ru/soft/ERDAS/index.htm>.

## Литература

543. Распространение радиоволн в земной атмосфере. Курс лекций. Веб-сайт [http://www.uftuit.uzpak.uz/Tatulib/lectures/afu/gasprostr\\_radiovoln/lecture\\_04.htm](http://www.uftuit.uzpak.uz/Tatulib/lectures/afu/gasprostr_radiovoln/lecture_04.htm).
544. РСА «Траверс» модуля «Природа» космической станции МИР. Веб-сайт <http://www.cosmoworld.ru/mirstation/experiments.html>.
545. *Савин А.И., Зотов Г.Ф., Петрущенко Ю.Е.* Система морской космической разведки и целеуказания. <http://www.navy.ru/science/sor7.htm>.
546. *Пантелеев В.Л.* Теория фигуры Земли / Курс лекций. МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет. 2000. Веб-сайт <http://astronet.ru/db/msg/1169819>.
547. *Путилин С., Лукин А.* Модификация метода нелокального усреднения для подавления шума в видео. МГУ им. М.В. Ломоносова, М. 2007. Веб-сайт [http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper\\_85.pdf](http://www.graphicon.ru/2007/proceedings/Papers/Paper_85.pdf).
548. Российская космическая система дистанционного зондирования Земли и перспективы ее развития / Доклад на конференции. ЦНИИМАШ, 12.11.2007. [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2007\\_pdf/plenar/nosenko.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2007_pdf/plenar/nosenko.pdf).
549. Специализированные пакеты для обработки радиолокационных изображений. Веб-сайт SOVZOND <http://www.sovzond.ru/software>.
550. Спутниковые системы: Все под контролем. «Газком» разработал проект общероссийской системы спутникового мониторинга Земли. 19.10.2004, «Ведомости». <http://www.mforum.ru/>.
551. Advanced Land Observation Satellite. Веб-сайт JAXA. <http://www.eors.jaxa.jp/ALOS/en/about/ALOS>.
552. Almaz-T space exploration. <http://www.astronautix.com/craft/almazt.htm>.
553. AN/APQ – Equipment Listing. <http://www.designation-systems.net/usmilav/jetds/an-apq.html>.
554. *Attema E., Levrini G., Davidson M.* Sentinel-1 ESS's New European Observatory // The Future or Remote Sensing, Second International Workshop of VITO & ISPRS Inter-Commission Working Group I/V Autonomous Navigation. [http://www.pegasus4europe.com/workshop/documents/contributions/Attema\\_full.pdf](http://www.pegasus4europe.com/workshop/documents/contributions/Attema_full.pdf).
555. *Chukhlantsev A.A., Shutko A.M., Sergei P., Golovachev S.P.* Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100–10000 MHz frequency band / Журнал радиоэлектроники. Электронный журнал. 2003. № 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb03/index>.
556. ENVISAT-1 Mission System. Critical Design Review. ENVISAT-1 Executive Payload Summary. ESA, Daimler-Benz Aerospace. Dornier. <http://envisat.esa/int/support-docs/pdf/mis-sys.pdf>.
557. ERSDAC PALSAR CEOS Format Specification. ERSDAC-VX-CEOS-004 Rev.1.6. ERSDAC. Tokyo, Japan. ERSDAC-VX-CEOS-004\_16.pdf.
558. ERSDAC PALSAR CEOS Format Specification. Forefront Tower 3-12-1 Kachidoki. Tokyo, Japan. 2007. ERSDAC-VK-CEOS-004\_16.pdf.
559. Eurimage. Price List. Веб-сайт <http://www.eurimage.com>.
560. FSPEC SAR Speckle Filters. Веб-сайт: [http://www.pcigeomatics.com/dev\\_corner/pcihlp\\_gateway.html](http://www.pcigeomatics.com/dev_corner/pcihlp_gateway.html).
561. Gunter's Space page/ Веб-сайт <http://space.skyrocket.de>.
562. [http://www.lpi.usra.edu/expmoon/Apollo17/A17\\_Orbital\\_souder.html](http://www.lpi.usra.edu/expmoon/Apollo17/A17_Orbital_souder.html) on February 21, 2007.
563. <http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/content/numbers/217/50.shtml>.
564. MDA Information Products – Geospacial Services. Веб-сайт [http://gs/mdacorporation.co./products/sensor/radarsat2/rs2\\_price.asp](http://gs/mdacorporation.co./products/sensor/radarsat2/rs2_price.asp).
565. Mission and spacecraft library // Quicklook. SEASAT. Веб-сайт <http://leonardo.jpl.nasa.gov/msl/QuickLooks/seasatQL.html>.
566. *Norris P.* Spies in the Sky. Surveillance Satellites in War and Peace. Springer Praxis Books. <http://www.springerlink.com/content/h6m352/>.
567. SAP Toolbox. Rockwell Science Center. Palo Alto Lab. Демонстрационный пакет для моделирования синтеза изображения в прожекторном режиме работы РСА. 1999. <http://www.killmine.com>.
568. *Soumekh M.* Synthetic Aperture Radar Synthesis with MATLAB Algorithms. A Wiley Inter-

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

- science Publication. John Wiley & Sons, Inc. N. Y. 1999. <http://www.acsu.buffalo.edu/~msoum/>.
569. SAR Lupe. The innovative program for satellite-based radar reconnaissance. OHB-System AG, Bremen, Germany. <http://www.ohb-system.de>.
570. SEASAT'1978. Веб-сайт <http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/seasat.html>.
571. Space. LACROSSE/ONYX. Radar Imaging Reconnaissance Satellite. Веб-сайт <http://www.globalsecurity.org/space/systems/lacrosse.htm>.
572. TerraSAR-X – Совзонд. Данные ДЗЗ со спутников. Веб-сайт <http://www.sovzond.ru/satellites/>.
573. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Basic Product Specification Document. DLR, Germany. 2008. TX-GS-DD-3302. TX-GS-DD-3302\_Basic-Product-Specification-Document\_1.5.pdf. <http://www.infoterra.de/tsx/freedata/start.php>.
574. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Level 1b Product Format Specification. DLR, Germany. 2008. TX-GS-DD-3307. 030201\_Level-1b-Product-Format-Specification\_1.3.pdf. <http://www.infoterra.de/tsx/freedata/start.php>.
575. The Image observed by The PALSAR. ERSDAC, Tokyo, Japan. PALSAR Project web-site <http://www.palsar.ersdac.or.jp/e/index.shtml>.
576. USA. Веб-сайт <http://www.astronautix.com/craft/usa.htm>.

## **Список публикаций непосредственных участников разработки радиолокаторов обзора земной и морской поверхности в ОАО «Концерн «Вега» и смежных организациях**

21\*, 33\*, 34\*, 35\*, 36\*, 37\*, 38\*, 39\*, 40\*, 41\*, 42\*, 43\*, 44\*, 46\*, 47\*, 48\*, 49\*, 63\*, 69\*, 73\*, 76\*, 88\*, 90\*, 121\*, 122\*, 123\*, 130\*, 131\*, 132\*, 133\*, 137\*, 138\*, 139\*, 140\*, 141\*, 149\*, 150\*, 151\*, 152\*, 153\*, 154\*, 155\*, 156\*, 157\*, 158\*, 159\*, 160\*, 161\*, 162\*, 163\*, 164\*, 166\*, 172\*, 173\*, 171\*, 172\*, 176\*, 177\*, 181\*, 183\*, 185\*, 192\*, 200\*, 206\*, 207\*, 208\*, 222\*, 223\*, 231\*, 232\*, 236\*, 241\*, 243\*, 244\*, 247\*, 360\*, 374\*, 375\*, 427\*, 428\*, 429\*, 430\*, 431\*, 432\*, 433\*, 434\*, 435\*, 439\*, 440\*, 468\*, 493\*

## **Список публикаций, освещающих вопросы радиолокационного зондирования в S-диапазоне волн**

12, 63, 78, 116, 166, 179, 180, 208, 223, 232, 242, , 432, 440, 472, 474, 493, 538

---

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

<b>АП</b> – антенный переключатель	<b>КК</b> – космический корабль
<b>АРЛИ</b> – амплитудное радиолокационное изображение	<b>КНД</b> – коэффициент направленного действия
<b>АФАР</b> – активная фазированная антенная решетка	<b>КРЛИ</b> – комплексное радиолокационное изображение
<b>АФАР - ГЗА</b> – гибридная зеркальная антенна с АФАР-облучателем	<b>КСВН</b> – космическая система военного назначения
<b>АЦП</b> – аналогово-цифровой преобразователь	<b>ЛЧМ</b> – линейная частотная модуляция
<b>БГВ</b> – быстрые гравитационные волны	<b>МКРЦ</b> – система морской космической разведки и целеуказания
<b>БД</b> – база данных	<b>МО</b> – Министерство обороны
<b>БПФ</b> – быстрое преобразование Фурье	<b>МТКК</b> – многоразовый транспортный космический корабль
<b>БРЛК</b> – бортовой радиолокационный комплекс	<b>МШУ</b> – маломощный усилитель
<b>БСК</b> – бортовой спецкомплекс	<b>ОБПФ</b> – обратное быстрое преобразование Фурье
<b>БФС</b> – блок формирования сигналов	<b>ОВЧ</b> – очень высокие частоты
<b>БЦВМ</b> – бортовая цифровая вычислительная машина	<b>ОЗУ</b> – оперативное запоминающее устройство
<b>ВИРСА</b> – видеоимпульсные радиолокаторы с синтезированной апертурой	<b>ПА</b> – пазовая антенна
<b>ВК</b> – выходной каскад	<b>ПЗУ</b> – постоянное запоминающее устройство
<b>ВПП</b> – взлетно-посадочная полоса	<b>ПЛ</b> – подводная лодка
<b>ВТО</b> – высотное оружие	<b>ПО</b> – программное обеспечение
<b>ВУМ</b> – выходной усилитель мощности	<b>ППМ</b> – приемопередающий модуль
<b>ГЗА</b> – гибридная зеркальная антенна	<b>ПРД</b> – передатчик
<b>ГКРЧ</b> – Государственная комиссия по радиочастотам	<b>ПРДУ</b> – передающее устройство
<b>ГМО</b> – гидрометеорообразование	<b>ПРМ</b> – приемник
<b>ДЗЗ</b> – дистанционное зондирование Земли	<b>ПУМ</b> – предварительный усилитель мощности
<b>ДН</b> – диаграмма направленности антенны	<b>РБО</b> – радиолокатор бокового обзора
<b>ДОР</b> – диаграмма обратного рассеяния	<b>РИП</b> – регулируемый источник питания
<b>ЗГ</b> – задающий генератор	<b>РЛИ</b> – радиолокационное изображение
<b>ИДЧ</b> – измеритель доплеровской частоты	<b>РЛН</b> – радиолокационное наблюдение
<b>ИСВН</b> – информационная система военного назначения	<b>РЛС</b> – радиолокационная станция
<b>КА</b> – космический аппарат	<b>РСА</b> – радиолокатор с синтезированной апертурой антенны
<b>КВЧ</b> – крайне высокие частоты	<b>СВЧ</b> – сверхвысокие частоты

### **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

<b>СВЧУ</b> – усилитель сверхвысокой частоты	<b>ЭРЛИ</b> – энергетическое (яркостное) радиолокационное изображение
<b>СДЦ</b> – селекция движущихся целей	<b>EUSAR</b> – Европейская конференция по радиолокаторам с синтезированной апертурой антенны (European Conference on Synthetic Aperture Radar. Berlin, Offenbach, VDE), Германия
<b>СКО</b> – среднеквадратическое отклонение	<b>IGARSS</b> – Международный симпозиум по географическим наукам и дистанционному зондированию Земли (International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE)
<b>СРЛН</b> – система радиолокационного наблюдения	<b>GPS</b> – спутниковая навигационная система (Global Position System)
<b>ТЗ</b> – техническое задание	<b>GRS</b> – Географические науки и дистанционное зондирование Земли (Geoscience and Remote Sensing)
<b>ТУМ</b> – транзисторный усилитель мощности	<b>NEBZ</b> – чувствительность PCA ( $\beta^0$ шумового эквивалента – Noise Equivalent Beta Zero)
<b>УВЧ</b> – ультравысокие частоты	<b>NESZ</b> – чувствительность PCA ( $\sigma^0$ шумового эквивалента – Noise Equivalent Sigma Zero)
<b>УМ</b> – усилитель мощности	
<b>УПЧ</b> – усилитель промежуточной частоты	
<b>УЭПР</b> – удельная эффективная площадь рассеяния	
<b>ФД</b> – фазовый детектор	
<b>ФРЛИ</b> – фазовое радиолокационное изображение	
<b>ФС</b> – формирователь сигналов	
<b>ФЧС</b> – формирователь частот и сигналов	
<b>ЭВМ</b> – электронная вычислительная машина	
<b>ЭПР</b> – эффективная площадь рассеяния	

## Основные обозначения в формулах и физические параметры

Обозначение	Наименование параметра	Значение
$a_e$	Большая (экваториальная) полуось земного эллипсоида: Эллипсоид ПЗ-90 Эллипсоид WGS-84	$a_e=6378136$ м $a_e=6378137$ м
$b_e$	Малая (полярная) полуось земного эллипсоида: Эллипсоид ПЗ-90 Эллипсоид WGS-84	$b_e=6356751$ м $b_e=6356752$ м
$c$	Скорость света	$c=299792448$ м/с
$D_{xant}$	Размер антенны, горизонтальный (азимутальный)	
$D_{yant}$	Размер антенны, вертикальный (угломестный)	
$e_o$	Эксцентриситет орбиты	
$e_e$	Эксцентриситет земного эллипсоида: Эллипсоид ПЗ-90 Эллипсоид WGS-84	$e_e=0,08181911$ $e_e=0,0818192$
$K$	Постоянная Больцмана	$K=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град
$K_{s0}$	Радиометрическое разрешение, по сумме шум+фон	
$K_s$	Радиометрическое разрешение, по приращению фона	
$L$	Суммарные потери в радиолокационном тракте РСА	
$M_{earth}$	Масса Земли	$M_{earth}=5,974242 \cdot 10^{24}$ кг
$N$	Число некогерентно накапливаемых импульсов (внутриэлементное и межэлементное накопление)	$N=N_e N_s$
$N_e$	Число некогерентно накапливаемых импульсов в элементе разрешения (внутриэлементное накопление)	
$N_{synt}$	Число когерентно накапливаемых импульсов в апертуре	
$N_s$	Число некогерентно накапливаемых импульсов по площади фрагмента (межэлементное накопление)	
$R$	Наклонная дальность	
$R_0$	Минимальная дальность на траверзе	
$R_e$	Радиус Земли (локальный)	
$R_{e\_mean}$	Радиус Земли, средний	$R_{e\_mean}=6371$ км



**Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

Обозначение	Наименование параметра	Значение
$R_s$	Радиус орбиты спутника	
$S_{ant}$	Эффективная площадь антенны	
$S_{geom}$	Геометрическая площадь цели	
$T_0$	Нормальная температура (градусы Кельвина)	$T_0=290^\circ \text{ K}$
$T_{star}$	Звездные сутки	$T_{star}=86164 \text{ с}$
$T_{sun}$	Солнечные сутки	$T_{sun}=86400 \text{ с}$
$T_{synt}$	Время синтеза	
$V_s$	Скорость КА (спутника)	
$V_{sg}$	Путевая (гринвичская) скорость КА	
$\gamma$	Угол визирования	
$\chi$	Угол падения	
$i$	Угол наклона орбиты	
$\alpha$	Центральный угол наблюдаемой точки	
$\Delta F$	Полоса частот зондирующего сигнала	
$\rho_x$	Разрешающая способность по азимуту	
$\rho_R$	Разрешающая способность по наклонной дальности	
$\rho_Y$	Разрешающая способность по горизонтальной дальности	
$\lambda$	Длина волны РСА	
$\mu$	Гравитационная постоянная Земли	$\mu=3,98602 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$
$\psi$	Угол скошенности, угол курса	
$\theta$	Угол тангажа	
$\sigma$	Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели	
$\sigma^0$	Удельная ЭПР фона местности	
$\sigma_{nc}^0$	Чувствительность РСА (эквивалентная УЭПР шумов)	
$\tau$	Длительность зондирующего импульса	
$\tau_c$	Длительность сжатого импульса	
$\varphi$	Фаза сигнала, географическая широта	
$\eta$	Коэффициент полезного действия (КПД)	
$\omega$	Угловая скорость	
$\omega_e$	Угловая скорость вращения Земли	$\omega_e=7,2921158553 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$
$\omega_o$	Угловая орбитальная скорость	
$\omega_{ep}$	Угловая скорость вращения Земли плюс скорость прецессии орбиты	
$\omega_p$	Угловая скорость прецессии орбиты	

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Владимир Степанович Верба.** Родился в 1954 г. в станице Брюховецкая Краснодарского края, окончил Таганрогский радиотехнический институт им. В.Д. Калмыкова (1978).

Доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, действительный член Российской академии естественных наук и Академии военных наук.

Генеральный директор – генеральный конструктор ОАО «Концерн «Вега» (Москва).

Генеральный конструктор Российской Федерации по системам дозора и управления авиационного базирования и комплексов с беспилотными летательными аппаратами.

Член научно-технического совета Военно-промышленной комиссии при Правительстве РФ. Председатель Совета директоров предприятий радиоэлектронного комплекса РФ.

Член Совета генеральных и главных конструкторов, ведущих ученых и специалистов в области высокоэкономичных секторов экономики при Председателе Правительства РФ.

Председатель Совета директоров предприятий радиоэлектронного комплекса РФ.

Автор более 280 научных работ, в том числе 38 патентов, 7 монографий, 9 учебников и учебных пособий.

*Область научных интересов:* радиолокация, системный анализ, проектирование информационно-управляющих систем авиационно-космического базирования.

Заведующий базовыми кафедрами: МФТИ «Радиоэлектронные информационные системы», МГТУ им. Н.Э.Баумана «Радиоэлектронные устройства», МИРЭА «Радиоприборостроение».

Член редколлегии ряда научных журналов, главный редактор журнала «Информационно-измерительные и управляющие системы».

Награжден орденом «Знак Почета».

**Леон Богуславович Неронский** родился в 1932 г. в селе Малаховка Московской обл., окончил Радиотехнический факультет Московского энергетического института (1955).

Доктор технических наук, профессор, Заслуженный конструктор РФ, главный научный сотрудник ОАО «Концерн «Вега».

Участник разработки и испытаний космической радиолокационной аппаратуры обзора земной и морской поверхности (заместитель главного конструктора, научный руководитель НИР).

Автор более 170 научных работ, в том числе 12 изобретений, 2 монографии, 2 учебных пособия.

*Область научных интересов:* радиолокация, дистанционное зондирование, обработка сигналов и изображений, моделирование систем радиолокационного наблюдения.

Профессор базовых кафедр: МФТИ «Радиоэлектронные информационные системы», МИРЭА «Радиоприборостроения».

Награжден медалями: им. В.Н.Кузнецова, им. В.Н. Челомея, «300 лет Российского флота» и др.

Член Института инженеров электрики и электроники (IEEE).

## **Радиолокационные системы землеобзора космического базирования**

---

**Игорь Георгиевич Осипов** родился в 1936 г. в г. Кировобаде Азербайджанской ССР, окончил факультет Вооружения Московского авиационного института (1959).

Заместитель генерального конструктора ОАО «Концерн «Вега» по космической тематике, Заслуженный конструктор РФ.

Участник разработки и испытаний аппаратуры для космических комплексов радиолокационного наблюдения, лазерных систем разведки (главный конструктор, научный руководитель НИР).

Автор более 40 научных работ, включая 9 изобретений, в области радиолокационной техники.

*Область научных интересов:* радиолокация, проектирование радиоэлектронной аппаратуры.

Награжден орденом «Трудового Красного Знамени», медалями «За трудовое отличие», «300 лет Российского флота», знаком Циолковского.

**Владимир Эдуардович Турук** родился в 1957 в г. Сасово Рязанской обл., окончил Радиотехнический факультет Московского института радиотехники, электроники и автоматики (1984).

Заместитель начальника отдела по НИОКР ОАО «Концерн «Вега», главный конструктор радиолокаторов землеобзора космического базирования.

Участник ОКР и НИР по созданию космических радиолокаторов обзора земной и морской поверхности (ведущий инженер, ответственный исполнитель, главный конструктор).

Автор более 20 научных работ в области радиолокационной техники.

*Область научных интересов:* проектирование, методы экспериментальной отработки радиолокационной аппаратуры.

Стипендиат Президента РФ за заслуги в области вооружений, военной и специальной техники (2008), лауреат премии им. П.С.Плешакова, награжден медалью «В память 850-летия Москвы», памятным знаком «200 лет Министерству обороны», Почетный радист.

---

**V.S. Verba, L.B. Neronskiy, I.G. Osipov, V.E. Turuk**

# **Space-borne Earth Surveillance Radar Systems**

*Edited by Prof. V.S. Verba*

## **Space-borne Earth Surveillance Radar Systems**

---

Scientific session  
«SYSTEMS OF AIR, SPACE AND EARTH SURFACE MONITORING»

**R e v i e w e r s :**  
Academician of RAS *L.M. Zeleny*, Prof. *G.S. Kondratenkov*,  
Academician of RAS *I.B. Fedorov*

**Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.**

**B31 Space-borne Earth Surveillance Radar Systems.** Edited by Prof. *V.S. Verba*. – M.: Radiotekhnika, 2010 – 680 pp.: 362 graphics, 576 ref. (Scientific series «Air, Space and Earth Surface Monitoring Systems», editor of series Prof. *V.S. Verba*.)

The monograph «Space-borne Earth Surveillance Radar Systems» is the third book from research series «Air, Space and Earth Surface Monitoring Systems».

It is devoted to new trends in the design of modern space radar surveillance systems, the outlook of their development prospects, principles of obtained data processing and application.

The monograph summarizes the results of long-term space development with the aim of setting global information system providing all-weather detailed observation of dynamic processes related with natural and man-made impact on Earth. The obtained results are a significant step to solve the problems of natural resources research, the control of economic activities, disasters monitoring, ensuring national safety due to colliding interests of different countries in the world community and antiterrorist' activities.

The monograph deals with the theory as well as the available scientific and technical groundwork to design space radar surveillance systems, to improve the methods of radar information obtaining and processing considering the experience of developments from the collective at JSC «Radio Engineering Corporation «Vega» (including production and employment of «Mech-K» and «Mech-KU» SARs of «Kosmos-1870» and «Almaz-1» satellites as well as development of perspective systems for ground and sea surface observations).

The basic material deals with the role of space segment in the design of dual application global Geoinformation system, the particulars in radio waves interaction with earth covers and surveillance objects, design principles, operation modes of earth remote sensing, parameters of trajectory signals caused by space vehicle orbital movement. Consideration was given to the problems of radar images synthesis, their primary and secondary processing and methods of increasing SAR information content considering instrument limitations.

The explanation was offered to up-to-date approaches in subject radar data processing, formation of radar data bank, automatization in the process of radar data interpretation. There are modeling algorithms of signal transformation processes in SAR path, methods of image quality estimation, problems in the calibration of output information product and correction of instrument distortions.

Examination is carried out on basic instrument decisions in the design of modern SAR, look back was performed in the development of Earth surveillance radar space facilities and detection of objects.

A special attention was paid to SAR new operation modes (squint scanning mode, dual receive mode of operation, high resolution wide swath - HRWS, possibilities of increasing resolution across the path by using a series of interferometric images). A detailed consideration was given to the particulars of the

### **Monograph Annotation**

---

space surveillance geometry including cases of high orbital SAR and SAR on geosynchronous orbit. For space-borne SARs, the ideas were stated on the most efficient algorithms in the synthesis of high resolution radar image, methods of radar image autofocusing considering accuracies of ballistic data and errors in propagation path.

Light was thrown on up-to-date methods of post-detection radar image processing including wavelet transformation and nonlocal filtration. These methods are illustrated by examples of radar images with the resolution of about 10 m, which were obtained by means of SAR «Mech-KU» «Almaz-1» satellite and single look complex (SLC) radar images with about 1 m resolution, obtained by means of TerraSAR-X and used in the Book with permission of Infoterra GmbH. An analysis was made on problems of radar images registration considering the parameters of reflectors and visual perception characteristics including the use of pseudocolor indication.

A special attention was paid to algorithms of signal transformation in SAR through path modeling using experimental complex (SLC) images. They can be efficiently used in SAR design, in ground preflight equipment development test on semi realistic simulation benches, in analysis of off-normal situations in SAR operation process, and also the interpretation of radar sensing data.

*The book is intended for a wide range of specialists in Earth radar and remote sensing – engineers, scientists related with the design of Geoinformation systems, development and use of civil and military radar surveillance facilities, and also for teachers, postgraduates and students of respective departments and universities.*

## MONOGRAPH STRUCTURE

<b>Comments .....</b>	<b>11</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>Chapter 1</b>	
<b>Space-Borne Earth Surveillance Radar Systems in Global Aerospace Monitoring System .....</b>	<b>25</b>
<b>Chapter 2</b>	
<b>Interaction of Radio Waves With Radar Surveillance Objects .....</b>	<b>59</b>
<b>Chapter 3</b>	
<b>Modern Methods of Space Earth Radar Surveillance.</b>	
<b>Basic Definitions .....</b>	<b>109</b>
Operating principle and basic performances of space side-looking radars and SAR, survey geometry in squint and bistatic survey modes. Bistatic survey mode with illumination from Tx radar on geostationary orbit. SAR power budget, spatial and radiometric resolution. Signal ambiguity function. Particulars of space-borne radar surveillance systems operation in active jamming exposure.	
<b>Chapter 4</b>	
<b>Space SAR Operation Modes .....</b>	<b>151</b>
Stripmap, ScanSAR, Spotlight, polarimetric operating modes. Interferometric radar survey. Extended SAR surveillance modes – Dual receive, high resolution wide swath Scansar mode (HRWS). SAR range resolution increasing by repeat pass interferometry mapping. Moving targets indication.	
<b>Chapter 5</b>	
<b>Calculation of Trajectory Signal Parameters in Space Radar Surveillance .....</b>	<b>181</b>
Coordinate systems, phase and amplitude time dependencies in SAR. Platform motion parameters for Geosynchronous orbits SAR.	
<b>Chapter 6</b>	
<b>Algorithms of Radar Images Synthesis in Space-Borne SAR .....</b>	<b>233</b>
Stages of radar signals processing and information product type. Range migration. Complex signals scaling procedures. Unified algorithm of image synthesis. Radar images autofocusing, search procedure of responses for radar image autofocusing. Squint and bistatic surveillance modes data synthesis. UWB video pulse SAR image synthesis.	
<b>Chapter 7</b>	
<b>Radar Images Registration and Processing .....</b>	<b>335</b>
Problems of noncoherent radar image processing. Wavelet transform and nonlocal speckle filtering procedure usage. Requirements for radio hologram and radar image registration. Visual perception characteristics of radar images for display presentation and hard copies. Characteristics of color and pseudocolor radar image display.	

## *Monograph Annotation*

---

<b>Chapter 8</b>	
<b>Improvement of Space SAR Information Content .....</b>	<b>405</b>
Consideration of nonlinearity effect in SAR path, suppression of range and azimuth ambiguous noises. SAR data compression.	
<b>Chapter 9</b>	
<b>Modern Approaches to Thematical Radar Data Processing .....</b>	<b>431</b>
Creation of banks for radar surveillance object images. Object point models formation. Sea ships traffic monitoring. Classification of sea targets under conditions of sea disturbance. Problems of sea surface remote sensing. Sea current velocity measurements. Ecological monitoring of offshore zones. Researches in occurrence of internal waves for detection of bottom topography. Detection of dangerous wave phenomena and their precursors. Ice cover monitoring. Terrain and vegetation cover sensing. Noncoherent and interferometry methods of change detection. Terrain relief mapping by radar stereo images and radar interferometry processing. Differential interferometry for changes detection and small shifts of land and objects measurements. Polarimetric interferometry. Methods of solving coordinate problems by radar sensing data. Joint processing of overlapping satellite photo and radar images.	
<b>Chapter 10</b>	
<b>Technologies of Radar Equipment Performance Modeling and Signal Transformation In Radar Path .....</b>	<b>499</b>
Advantage of complex images usage for SAR signals modeling. Preparation of basic material. Modeling of interferometry processing, moving target indication, semirealistic simulation in SAR equipment development, testing and inflight diagnostics.	
<b>Chapter 11</b>	
<b>SAR Calibration .....</b>	<b>511</b>
Procedures of SAR parameters evaluation. Integral heuristic criterion in estimation of SAR space information content. Methods of SAR equipment parameters estimation in flight and distortion correction in data processing.	
<b>Chapter 12</b>	
<b>Improvement of Equipment for Spaced-Borne Earth Surveillance Radar Systems .....</b>	<b>549</b>
System approach to design of space radar surveillance equipment SAR antennae. Combined two-band APAA of wave L- and P-bands. Hybrid S-band mirror antenna for small satellite SAR. Hybrid mirror antenna with APAA-feed. Active antenna arrays and their elements for video-pulse SAR. Local stable oscillator. Elements of Tx and Rx modules.	
<b>Chapter 13</b>	
<b>Space Equipment for Radar Surveillance of Ground Surface and Ground (Overwater) Objects .....</b>	<b>577</b>
Stages in manufacture of space radar surveillance equipment. Lookback in development of space-borne SAR. Scientific engineering groundwork. State and outlook in development of space-borne Earth surveillance SAR	
<b>Conclusion .....</b>	<b>635</b>
<b>References .....</b>	<b>637</b>



Научная серия  
«Системы мониторинга воздушного, космического пространства  
и земной поверхности»

Редактор серии  
Владимир Степанович Верба

**Радиолокационные системы землеобзора  
космического базирования**

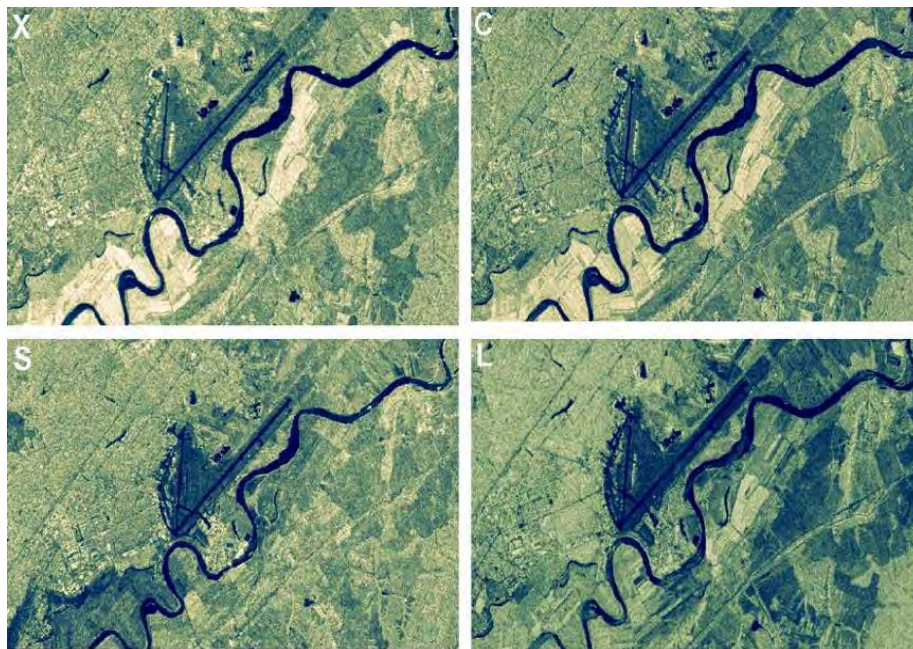
Под редакцией  
доктора технических наук, профессора В.С. Вербы

Авторы:  
Владимир Степанович Верба  
Леон Богуславович Неронский  
Игорь Георгиевич Осипов  
Владимир Эдуардович Турук

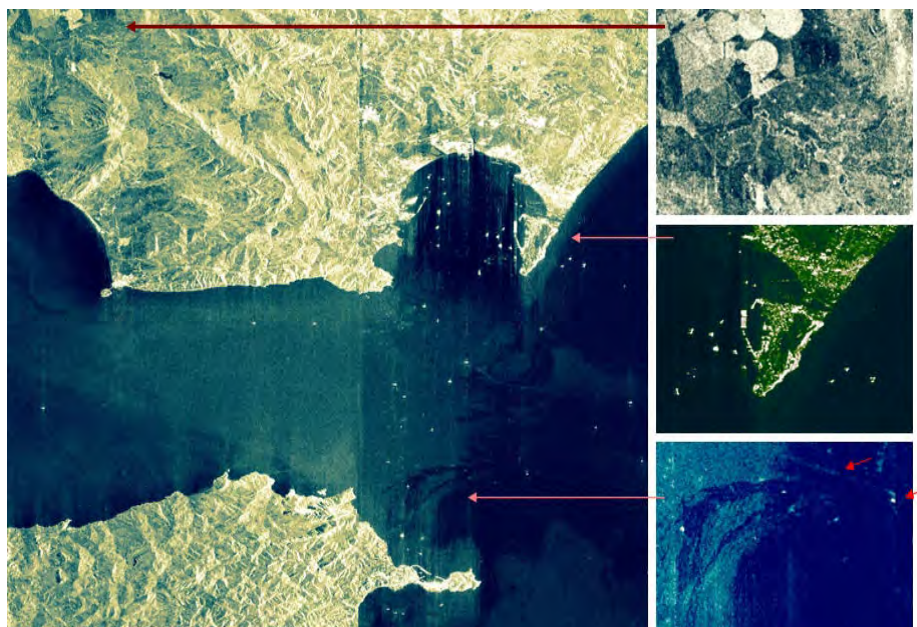
Изд. № 22. Сдано в набор 13.04.2010.  
Подписано в печать 15.09.2010. Формат 70×100 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать офсетная  
Печ. л. 42,5. Тираж 1000 экз. Зак. №

Издательство «Радиотехника».  
107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6.  
Тел./факс: (495)621-48-37; 625-78-72, 625-92-41.  
E-mail: info@radiotec.ru  
www.radiotec.ru

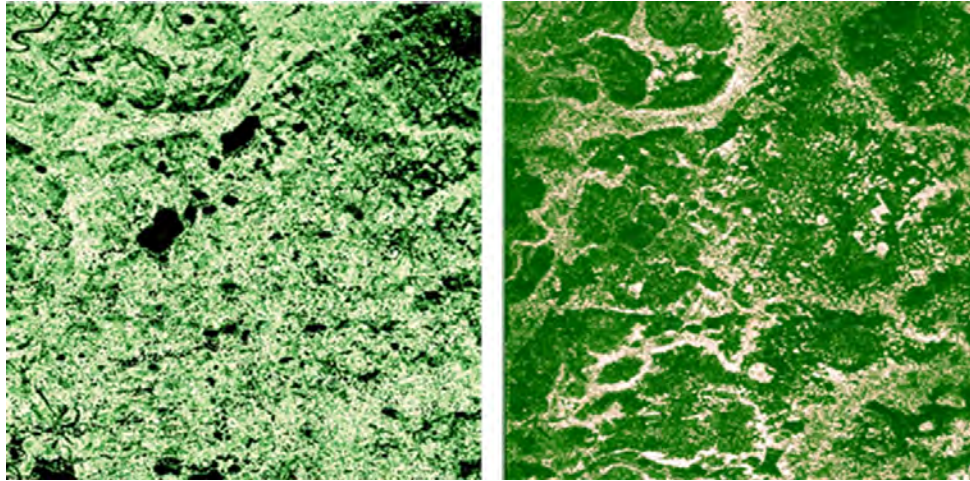
Отпечатано в ООО ПФ «Полиграфист».  
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, д. 3.



**Рис. Ц.1.** Изобразительные свойства радиолокационных снимков, снятых в  $X$ -,  $C$  и  $L$ -диапазонах волн (SIR-C/X-SAR) и в  $S$ -диапазоне волн (РСА «Меч-КУ» КА «Алмаз-1»).  
Псевдоцветное изображение (ср. с ч/б РЛИ на рис. 2.1)



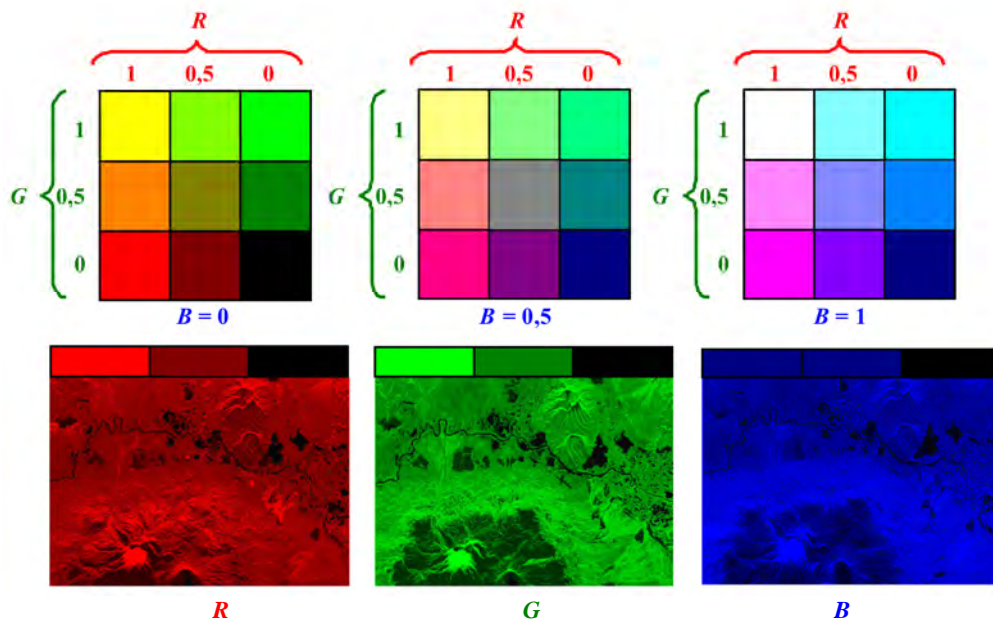
**Рис. Ц.2.** Псевдоцветное радиолокационное изображение пролива Гибралтар и прибрежной территории (ср. с ч/б РЛИ на рис. 3.7). РСА «Меч-КУ» (КА «Алмаз-1»)



*a)*

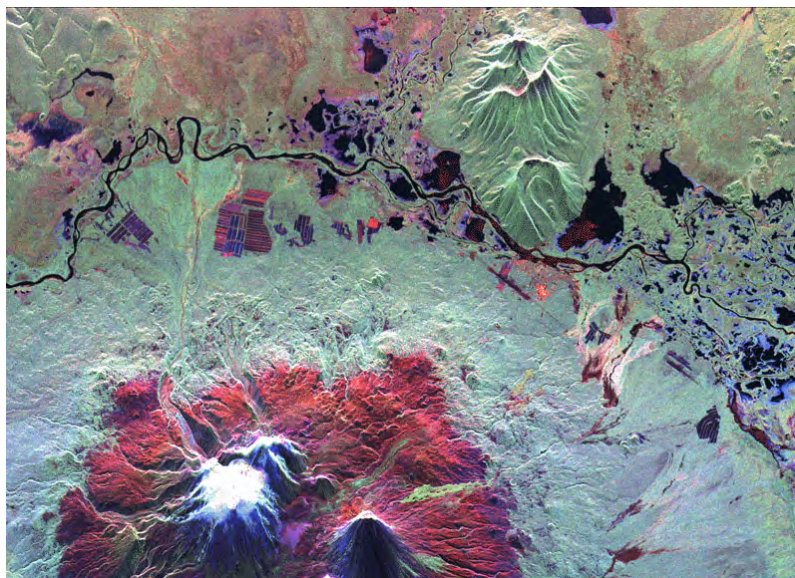
*б)*

**Рис. Ц.3.** Псевдоцветные радиолокационные изображения месторождения Лангепас (Западная Сибирь), полученные РСА «Меч-КУ» (КА «Алмаз-1»):  
*a* – летнее; *б* – зимнее (*б*). Сравнить с рис. 2.26

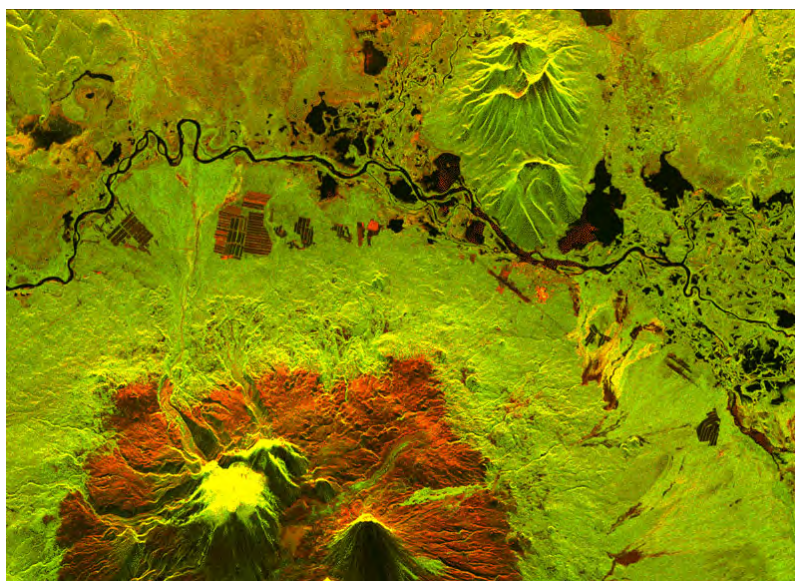


**Рис. Ц.4.** Формирование цветных композитных радиолокационных изображений по монохромным составляющим: красный ( $R$ ) –  $L$ -диапазон ГГ-поляризации; зеленый ( $G$ ) –  $L$ -диапазон ГВ-поляризации; синий ( $B$ ) –  $C$ -диапазон, ГВ-поляризации





*a)*



*б)*

**Рис. Ц. 5.** Цветные композитные поляриметрические радиолокационные изображения:  
вулкана), сформированные по информации, полученной PCA SIR-C/X-SAR, КК Endeavour [522]:

*a* – двухчастотное *L*-диапазон (ГГ и ГВ) и *C*-диапазон (ГВ);

*б* – одночастотное *L*-диапазон (ГГ и ГВ).

Цвета: *L*-диапазон ГГ – красный; *L*-диапазон ГВ – зеленый; *C*-диапазон ГВ – синий.

Вулкан Ключевская сопка (Камчатка, Россия)



**Рис. Ц.6.** Демонстрационный комплект космического аппарата УС-АМ с раскрытыми антеннами РБО РИФ. ОКБ «Арсенал» [11]



**Рис. Ц.7.** Общий вид космического аппарата «Алмаз-1» на ВДНХ с раскрытыми волноводно-щелевыми антеннами РСА «Меч-КУ» и подготовленной к раскрытию АФАР линии передачи данных. Солнечные батареи находятся в сложенном положении на корпусе КА



**Рис. Ц. 8.** Испытания в безэховой камере ОАО «ВПК «НПО машиностроения») гибридной зеркальной антенны РСА для космического аппарата «Кондор-Э»





*В. С. Верба*



*Л. Б. Неронский*



*И. Г. Осипов*



*В. Э. Турук*

---

Данная монография - третья книга из научной серии «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности» посвящена новым направлениям построения современных космических систем радиолокационного наблюдения, перспективам их развития, принципам обработки и использования получаемой информации. Монография обобщает результаты многолетних исследований по созданию глобальной информационной системы, обеспечивающей всепогодное детальное наблюдение динамических процессов, связанных с естественными и антропогенными явлениями на планете Земля. Достигнутые к настоящему времени результаты являются значительным шагом к решению задач исследования природных ресурсов, контроля результатов хозяйственной деятельности, мониторинга катастроф и обеспечения национальной безопасности.

*Книга предназначена для широкого круга специалистов по радиолокации и дистанционному зондированию Земли, инженеров, научных сотрудников, связанных с проектированием геоинформационных систем, созданием и применением средств радиолокационного землеобзора гражданского и военного назначения, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих факультетов и вузов*

---

ISBN 978-5-88070-156-8



9 785880 170156 8

Издательство «Радиотехника»  
107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6  
Тел./факс: +7(495)621-48-37; 625-78-72, 625-92-41  
e-mail: info@radiotec.ru  
<http://www.radiotec.ru>