

На правах рукописи



ТУЛЬСКИЙ ИВАН НИКОЛАЕВИЧ

**Повышение эффективности передачи мультимедийной информации  
методом чирплет-преобразования**

05.13.17 - Теоретические основы информатики

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Середкин Вениамин Георгиевич

Официальные оппоненты: Кашкин Валентин Борисович,  
доктор технических наук, профессор, Сибирский  
федеральный университет, кафедра радиотехники,  
профессор

Рубцов Виталий Дмитриевич,  
доктор технических наук, профессор, Московский  
государственный технический университет  
гражданской авиации, кафедра технической  
эксплуатации радиоэлектронных систем воздушного  
транспорта, профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Томский государственный  
университет систем управления и  
радиоэлектроники

Защита состоится 22 мая 2012 года в 14<sup>15</sup> часов минут на заседании диссертационного совета Д 212.099.11 при Сибирском федеральном университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. акад. Киренского, 26, ауд. УЛК 115.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан апреля 2012 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Покидышева Людмила Ивановна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Одной из проблем, возникающих при передаче информации по современным цифровым телекоммуникационным системам, является высокая информационная плотность и скорость информационных потоков, обусловленные, в частности, всё большей насыщенностью последних сложными мультимедиа элементами (графика, видеофрагменты, звук). Это, в свою очередь, требует повышения качества каналов связи. Качество современных телекоммуникационных систем характеризуется пропускной способностью, их помехоустойчивостью, надежностью, вычислительной мощностью конечных терминалов и т.д.

Одним из приоритетных направлений решения обозначенной проблемы является разработка передовых способов и методов преобразования и кодирования информации, создание и исследование информационных моделей и алгоритмов сжатия (компрессии) мультимедиа информации для высокоскоростной передачи по цифровым радиоканалам телекоммуникационных систем. Вопросы разработки методов и алгоритмов компрессии мультимедийной информации для использования в составе телекоммуникационных систем, в частности, цифровых радиосетей с учетом их специфики, активно исследуются в работах отечественных (А.Л. Приоров, И.В. Родионов) и зарубежных (Bernd Jahne, I. Daubechies) авторов.

Однако в известных работах представлены решения локальных задач, не содержащие методов и алгоритмов для широкого применения. Более того, используемые подходы зачастую не отвечают целому ряду требований телекоммуникационных систем третьего и четвертого поколений и, как правило, не могут в полной мере обеспечить их высокую пропускную способность.

В связи с неуклонно растущими требованиями к качеству передаваемой информации в настоящее время практически полностью отсутствуют эффективные имитационные модели каналов передачи данных в условиях широкополосных помех, позволяющие осуществлять разработку и

исследования аппаратных и программных решений при организации передачи данных по высокоскоростным цифровым беспроводным сетям.

Решение лежит в области разработки новых алгоритмов компрессии, основанных на применении систем математических преобразований, в том числе, на основе косинусного преобразования, вейвлет-преобразования и т.д. При этом необходимо учитывать специфику средств для организации беспроводных телекоммуникационных систем, методы их организации, а также накладываемые ограничения на вычислительные мощности конечных (например, мобильных) терминалов. Всё это позволит перейти на качественно новый уровень в организации высокоскоростных каналов связи, увеличить пропускную способность беспроводных сетей и помехозащищенность каналов связи, а также уменьшить требования к вычислительным ресурсам мобильных терминалов.

**Целью** данной работы является исследование и разработка моделей и методов преобразования и кодирования информации для передачи по высокоскоростным телекоммуникационным системам.

**Объект исследования:** алгоритмы, методы и программно-аппаратное обеспечение, используемые для передачи информации в беспроводных сетях связи.

**Предмет исследования:** повышение надежности обработки информации и обеспечение помехоустойчивости информационных коммуникаций при высокоскоростном обмене мультимедийными данными посредством беспроводных, цифровых телекоммуникационных систем.

**Задачи исследования:**

– анализ проблем обеспечения эффективного сжатия мультимедиа информации с учётом специфики беспроводных цифровых телекоммуникационных систем связи;

– разработка метода и алгоритма компрессии на основе математического аппарата чирплет-преобразования;

– разработка метода передачи мультимедиа информации в беспроводных телекоммуникационных системах с использованием предложенного алгоритма компрессии;

– исследование помехоустойчивости, ресурсоемкости и временных характеристик разработанного метода;

– экспериментальная проверка и апробация разработанного алгоритма (аппаратно-программного кодека) на основе ПЛИС и микропроцессорной техники.

**Методы исследования.** Поставленные задачи решены современными методами вычислительной математики, математического анализа, цифровой обработки сигналов. При разработке программного и аппаратного обеспечения использовались средства САПР Mat Lab 2010b, Lab VIEW, а также средства разработки программ Visual Studio 2010, keil uVision4, Quartus2 10.1. Для аппаратной реализации использовалась аппаратура собственной разработки на основе ПЛИС фирмы Altera, аппаратура из состава National Instruments.

#### **Результаты, выносимые на защиту:**

1. Метод и алгоритм компрессии мультимедиа информации для современных телекоммуникационных систем связи на основе математического аппарата чирплет-преобразования;
2. Метод передачи мультимедиа информации в беспроводных цифровых сетях связи на основе разработанного алгоритма;
3. Комплекс программных средств имитации приема передачи мультимедиа информации, сжатых алгоритмами, использующими математические чирплет-, косинусного и вейвлет-преобразования;
4. Библиотека с программным кодом, реализующая взаимодействие базовых операций обработки мультимедиа информации.

#### **Научная новизна** заключается в следующем:

1. Разработан метод и реализован алгоритм компрессии мультимедиа информации для цифровых беспроводных телекоммуникационных систем третьего и четвертого поколения на основе математического чирплет-преобразования, позволяющий значительно уменьшить информационную плотность передаваемого потока, порядка 20% по сравнению с используемыми на сегодняшний день;

2. Разработан метод передачи мультимедиа информации, для телекоммуникационных систем третьего и четвертого поколения, использующий разработанный алгоритм сжатия на основе математического аппарата чирплет-преобразования, позволяющий значительно упростить организацию конечных терминалов, сократить время обработки данных в 2–3 раза, увеличить помехозащищенность канала в 2,5 раза, и, как следствие, увеличить его пропускную способность.
3. Разработаны имитационные модели для исследования различных информационных каналов связи, использующихся при передаче мультимедиа информации, которые, в отличие от известных моделей, позволяют осуществлять программно-аппаратную симуляцию широкого спектра помех, а также выполнять анализ соотношений сигнал-шум и метрики структурного подобия;

**Значение для теории.** Развиты теоретические основы создания, обработки и преобразования информационных потоков, а также взаимодействия информационных моделей.

**Практическое значение работы** заключается в следующем:

1. Разработан программно-аппаратный комплекс симуляции и анализа информационных потоков в беспроводных сетях связи;
2. Разработаны библиотеки программного обеспечения для процессорных ядер Cortex M3, ARM7, ARM9 и ARM11, реализующие кодек компрессии и восстановления мультимедиа информации на основе математического аппарата чирплет-, вейвлет- и косинусного преобразования;
3. Разработано программное обеспечение для ЭВМ, реализующее функции компрессии и восстановления мультимедиа информации на основе математических аппаратов косинусного, чирплет- и вейвлет-преобразования.

**Достоверность полученных результатов** исследования, защищенная приоритетом авторских публикаций, достигается корректностью применения используемого математического аппарата и удовлетворительной

сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на открытых семинарах ОАО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева», кафедры «Вычислительная техника» ИКИТ СФУ и НУЛ «Микропроцессорные системы» ИКИТ СФУ, а так же на следующих конференциях: Международная заочная научно-практическая конференция «Наука и техника 21 века» г. Новосибирск, 2011г.; XI Всероссийская научно-техническая конференция и школа молодых ученых, аспирантов и студентов «Научные исследования и разработки в области авиационных, космических и транспортных систем» (АКТ-2010), г. Воронеж, 2010г.; 10-я Научно-практическая конференция «Интеллект и наука», 2010г., ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Филиал ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Железногорск; 8-я конференция специалистов организаций ракетно-космической, авиационной и металлургической промышленности России, г. Королев, 2010г.

**Использование результатов работы.** Результаты исследований диссертационной работы используются при организации высокоскоростных каналов обмена данными датчиковой аппаратуры космических аппаратов в ОАО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева» и ОАО «НПК Системы прецизионного приборостроения», а также внедрены в учебный процесс ФГОУ ВПО «Сибирский Федеральное университет» для подготовки специалистов по направлению 230100 «Вычислительная техника» в курсе лекций по дисциплине «Интерфейсы периферийных устройств». Использование результатов работы подтверждено соответствующими актами.

**Публикации.** По результатам проведенных исследований и выполненных работ опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 работы из списка изданий, рекомендованных ВАК. Кроме того, получено положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, выполнена на 115 страницах, содержит 27 рисунков, 25 таблиц, список используемых источников из 62 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверности полученных результатов.

**В первой главе** диссертационной работы изложены результаты анализа предметной области, на основании которых отмечено, что для улучшения качества доставки мультимедиа сообщений с учетом специфики телекоммуникационных систем требуется рассмотреть возможность модернизации существующих методов и алгоритмов компрессии и разработки альтернативных методов и подходов передачи и обработки мультимедиа информации.

Одной из специфических проблем при передаче по беспроводным телекоммуникационным системам третьего и четвертого поколения является организация сервиса: мобильное, интерактивное и спутниковое телевидение и передача мультимедиа информации.

Рассмотрены методы и решения, с применениями алгоритмов сжатия мультимедиа информации, как с потерями, так и без потерь. Проведен анализ среди существующих алгоритмов, рассмотрены стандартные методы кодирования и их основные недостатки. Рассмотрены критерии оценки мультимедийной информации и типы данных, по которым необходимо оценивать качество мультимедийной восстановленной информации.

Описаны алгоритмы и методы для компрессии мультимедийной информации, применяемые на сегодняшний день для телекоммуникационных сетей, описаны их недостатки и возможные варианты по модернизации для качественного улучшения характеристик.

Рассмотрены правила компрессии потокового видео трафика и создания контейнеров для кодирования мультимедиа информации.

Для исследований в качестве базовых программно-аппаратных средств (кодек), реализующих известные методы и алгоритмы компрессии при передаче по беспроводным сетям принят 3GP кодек, использующий алгоритм косинусного преобразования и являющийся развитием кодека H.263.

Поддержка формата 3GP в терминалах осуществлена на программном уровне, и лишь в ряде случаев обеспечивается полная аппаратная поддержка. Помимо этого для передачи информации с использованием кодека 3GP, необходимы дополнительные меры защиты передаваемого битового потока, которые также поддерживаются в терминалах на программном уровне.

Например, в цифровых сотовых сетях 3G–4G применяется распространённая защита битового потока для групповых ошибок в процессе передачи (FEC – forward error correction), а как негативный факт применения FEC – это количество избыточной информации, которая в ряде методов может превышать 37%.

Область решения задач, сводится к улучшению методов доставки и обработки мультимедийной информации и улучшению характеристик телекоммуникационных систем потоковой доставки мультимедиа трафика, а также увеличению помехозащищённости передаваемого битового потока.

Для анализа непостоянного сигнала, в котором информативным является сам факт изменения при передаче частотно-временных характеристик сигнала (примерами таких сигналов являются речь, музыка, изображение), требуются базисные функции, способные выявлять как частотные, так и временные характеристики, то есть обладающие частотно-временной локализацией. Сутью нового метода и алгоритмов сжатия мультимедийной информации является использование математического аппарата чирплет-функций, в частности, чирплет-разложения сигнала, при котором, в отличие от косинусного преобразования, базисную функцию не только смещают во времени, но и масштабируют, чтобы получить многократное перекрытие сигнала.

Впервые чирплет-преобразование было предложено в 1988 году Стивом Манном – данное преобразование было применено для обработки и анализа информации от эхолокатора.

Вейвлет – это отрезок волны [wave], а чирплет – соответственно, отрезок ЛЧМ-сигнала [chirp]. Точнее, чирплет – результат умножения такого сигнала на окно, что обеспечивает свойство локализованности во времени.

В условиях частотно-временного пространства линейно частотно модулированные импульсы существуют как вращающиеся, сдвинутые, деформированные структуры, движущиеся от традиционного параллелизма по временной и частотным осям, типичным для волн Фурье. Таким образом, чирплет-преобразование является повернутым, взвешенным или, иначе, измененным представлением частотно-временной плоскости.

Любой сигнал мы можем рассмотреть как взвешенную сумму (декомпозицию) Гауссовских чирплетов. Гауссовский чирплет – это отрезок волны с четырьмя параметрами и гауссовской огибающей, представлен в виде:

$$g_{t_c, w_c, c, V_t}(t) = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\pi} V_t}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t-t_c}{V_t} \right)^2} e^{j[c(t-t_c) + \omega_c](t-t_c)}, \quad (1)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $t_c$  – момент времени, в который присутствует максимальная концентрация энергии,  $\omega_c$  – центральная частота,  $V_t$  – смещение по временной оси,  $c$  – норма, характеризующая скорость изменения частоты.

Таким образом, чирплет-преобразование сигнала определено как результат между функцией  $f(t)$  и Гауссовским чирплетом  $g_{t_c, w_c, c, V_t}$  и представлено в виде:

$$a_{t_c, w_c, c, V_t} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g_{t_c, w_c, c, V_t}^*(t) dt, \quad (2)$$

где  $*$  обозначает комплексно сопряженную операцию,  $a_{t_c, w_c, c, V_t}$  отображает количество энергии сигнала в пространстве «частота – время» и значения коэффициентов в амплитудной плоскости.

Чирплет-параметры принято заменять индексом  $I = (t_c, w_c, c, V_t)$ . Тогда произвольный сигнал есть линейная комбинация Гауссовских чирплетов:

$$f(t) = \sum_{n=1}^P a_{I_n} g_{I_n}(t) + R^{P+1} f(t) = f_P(t) + R^{P+1} f(t), \quad (3)$$

где  $I_n$  – набор параметров чирplet-функции,  $f_p(t)$  – есть результат аппроксимации, полученный из сигнала на шаге  $P$ ,  $R^{P+1}f(t)$  – остаток (остаточная составляющая сигнала, полученная после аппроксимации  $f$  с помощью  $g_{I_n}$ , анализируется аналогичным способом)

Если вейвлет-преобразование основано на вейвлетах, имеющих форму функции (базис функции)  $f(t)=(ax+b)$ , то чирплеты  $p$ -типа выражаются как  $f(t)=((at+b)/(ct+1))$ , где:  $a$  – масштаб,  $b$  – сдвиг,  $c$  – «чирп-рэйт» (наклон частоты).

Существует две основных категории чирplet-преобразования: фиксированное и адаптивное. Далее, эти категории могут быть разделены: на основании выбора ЛЧМ, на основании выбора окна.

И в фиксированном, и в адаптивном случае чирплеты могут быть:

- $q$ -чирплетами – в форме  $\exp(j2\pi(at^2+bt+c))$ . По сути,  $q$ -чирplet является взвешенным ЛЧМ-сигналом, отсюда и его название (квадратичное изменение фазы означает линейное изменение частоты).

- $w$ -чирплетами, или «варблетами». «Невзвешенный варблет» в частотно-временной плоскости выглядит как синусоида или похожая на нее кривая. Таким образом, варблет – взвешенный сигнал с периодическим частотно-временным изображением.

- $D$ -чирплетами, или чирплетами Доплера. Этот тип имитирует Доплеровский сдвиг частоты.

Применяемые окна: Гаусса, прямоугольное.

**Во второй главе** изложен предлагаемый метод, алгоритм компрессии мультимедиа информации и метод передачи данных на основе алгоритма сжатия с использованием математического аппарата чирplet-преобразования.

Основным недостатком ранее разработанных методов на основе косинусного преобразования является то, что при обработке больших изображений, появляются артефакты в виде помех изображения. Это обусловлено тем, что косинусное преобразование имеет плохую частотно-пространственную локализацию, а также тем фактом, что при отправке используется весь массив отсчетов. В свою очередь, восстановление исходной информации требует весь прием пакетов, что приводит к загрузке

канала приема передачи, плохой помехоустойчивости, и загрузке памяти и вычислительных ресурсов.

Для исключения этих недостатков был предложен метод на основе вейвлет–преобразования. Однако его применение не получило широкого распространения ввиду большого количества различных оконных вейвлет-функций, которые для разных классов изображений имеют лучшие или худшие характеристики. Кроме того, на сегодняшний день нет единого стандарта и подхода к реализации этого метода, а также кодеков на его основе. Еще одним фактором, сдерживающим внедрение стандарта на основе математического аппарата вейвлет–преобразования, является наличие сложностей с авторскими правами на данные методы и алгоритмы.

В настоящий момент для применения в телекоммуникационных системах требуется достаточно универсальный и простой алгоритм, по возможностям схожий с кодеками на основе вейвлет-функций и легко адаптируемый в уже существующие контейнеры сжатия. Как уже было сказано, для такого метода и алгоритмов сжатия подходит аппарат дискретного чирплет-преобразования. Отличительной особенностью дискретного чирплет-преобразования является то, что в настоящее время оно не имеет широкого распространения в мультимедийных и графических приложениях.

Важной отличительной чертой данного преобразования заключается в том, что отсчеты записывают в единый поток данных, замещая предыдущие значения. Все перезаписанные ранее отсчеты заменяются новыми, и для дальнейших вычислений необходимы только текущие отсчеты.

Рассмотрим алгоритмы по обработки изображений, и видеопоследовательностей, построенные на базе математического аппарата чирплет-преобразования. При применении чирплет-преобразования происходит разложение исходных отсчетов вектора на низкочастотные и высокочастотные составляющие. В то же время, в реальных изображениях, видеопоследовательностях большая часть информации расположена в области низких частот.

Кодирование в чирплет-преобразовании раскладывает изображение в ортонормированном базисе:

$$B = \{g_m\} 0 \leq m < N \quad (4)$$

и оптимизирует сжатие коэффициентов разложения.

Предположим, что есть случайный процесс  $Y[n]$ , тогда

$$Y = \sum_{m=0}^{N-1} Y_B[m] g_m \quad , \quad (5)$$

где каждый коэффициент  $Y_B[m]$  есть случайная переменная из равенства:

$$Y_B[m] = \langle Y, g_m \rangle = \sum_{i=0}^{N-1} Y[i] g_m^*[i] \quad (6)$$

Основой для разложения изображения в базисе чирплет-преобразования является набор банков фильтров, аналогичных в вейвлет-преобразовании. Сначала сигнал пропускается через низкочастотный фильтр (Low pass) с импульсным откликом  $g$ , получается свертка двух сигналов:

$$y[m] = (x * y)[m] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x[i] g[m-i] \quad , \quad (7)$$

где  $*$  – операция свертки двух сигналов,  $i \in [+\infty; -\infty]$ .

Одновременно сигнал раскладывается с помощью высокочастотного (high-pass) фильтра  $h$ . В результате получают детализирующие коэффициенты (при прохождении ВЧ фильтра) и коэффициенты аппроксимации (при прохождении НЧ фильтра) принимают вид:

$$\begin{aligned} y_{low}[m] &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} x[i] g[2m-i] \\ y_{high}[m] &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} x[i] h[2m-i] \end{aligned} \quad (8)$$

Простой одноуровневый фильтр показан на рисунке 1.

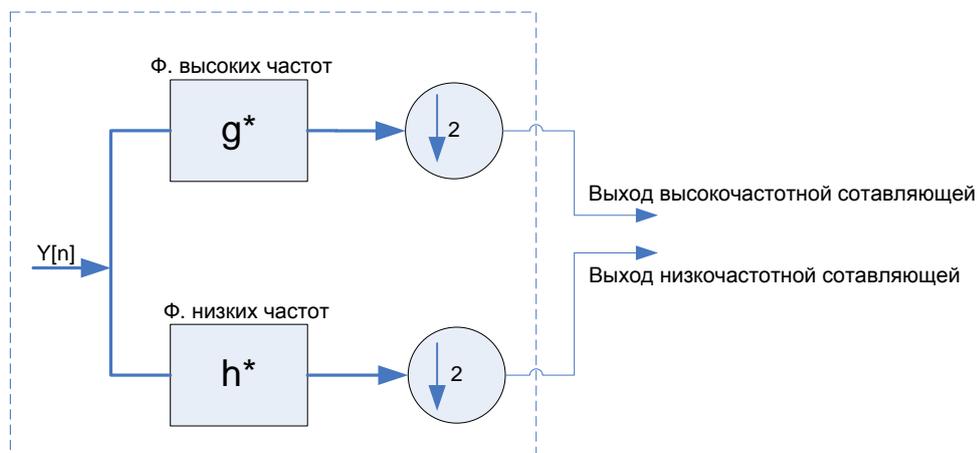


Рис 1. Представление чирплет-преобразования в виде банка фильтров

Такое разложение вдвое уменьшило разрешение по времени в силу прореживания сигнала. Однако каждый из получившихся сигналов представляет половину частотной полосы исходного сигнала, так что частотное разрешение удвоилось.

Для обработки мультимедиа информации представлен алгоритм сжатия изображения (рис. 2).

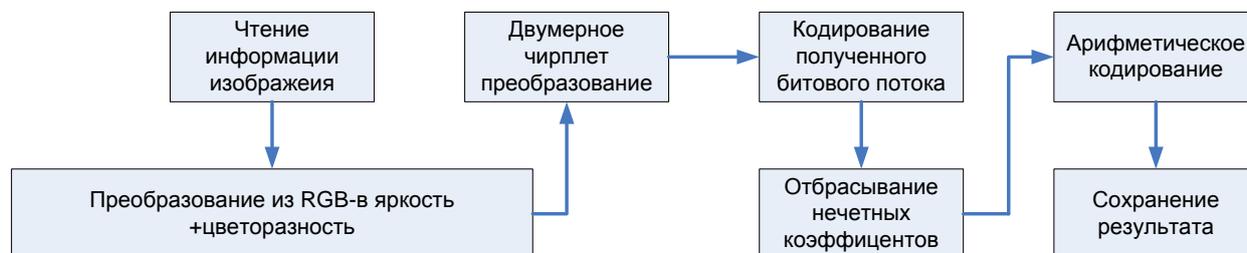


Рис 2. Алгоритм обработки изображений

Работу кодека на основе чирплет-преобразования можно представить в виде следующих этапов (рис. 3):

- препроцессинг – этап, задача которого предварительно обработать изображение и привести его к удобному для последующего кодирования виду;
- дискретное чирплет-преобразование (ДЧП) используется кодером для перевода мультимедиа информации от его пространственно-временного представления к спектральному (отображение сигнала в чирплет-пространстве);
- округление (квантование) – этап, где производится основная потеря информации за счет отбрасывания высокочастотных ДЧП-коэффициентов;
- поблочное кодирование – кодирование полученных отсчетов стандартными алгоритмами (кодирование повторов, арифметическое кодирование и т.д.).
- Аналогичным образом обрабатывается потоковый видео-трафик. Надо сказать, что обрабатываемую последовательность группируют по 16–18 кадров. Такая группировка кадров удобна для анализа и обеспечивает эффективную степень компрессии при сопоставимой скоростью обработки данных. При этом пакеты кадров из 16–18 элементов могут быть эффективно сжаты с помощью 4–5 рекурсивных обращений чирплет-преобразования. Алгоритм представлен на рисунке 4.

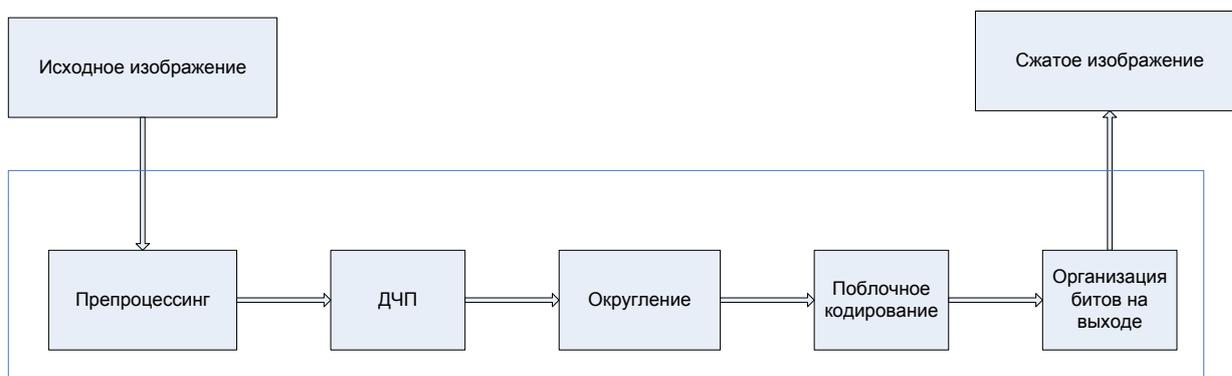


Рис 3. Этапы работы кодека на основе чирплет-преобразования

Необходимо отметить, что поток отсчетов, сформированный с применением математического аппарата чирплет-преобразования, обладает гибкостью во времени как внутри кадра, так и между кадрами, что позволяет производить эффект плавной загрузки или эффект предпросмотра. Это свойство дает возможность применять сервисы, как с поочередной загрузкой всех кадров, так и сервисы доставки с одновременной загрузкой мультимедиа трафика. При этом в случае внесения случайных ошибок или обрыва связи, а также потере пакета, изображение будет высокого качества, но объект движения будет нечетким. Однако, при успешной загрузке всех кадров, видео-трафик будет восстановлен полностью и высоким разрешением и качеством.

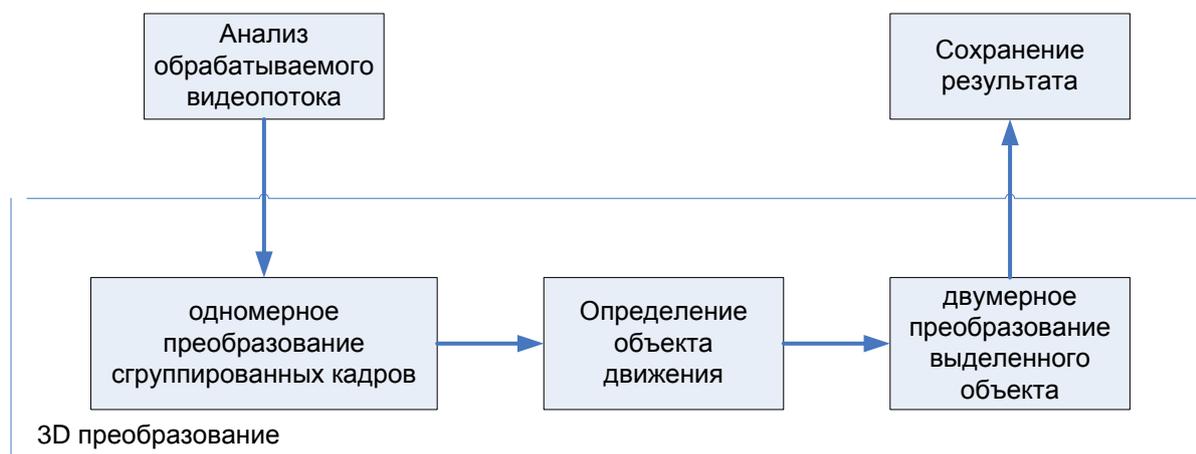


Рис.4 Структурная схема предложенного метода обработки видеопоследовательности

Необходимо отметить, что поток отсчетов, сформированный с применением математического аппарата чирплет-преобразования, обладает гибкостью во времени как внутри кадра, так и между кадрами, что позволяет производить эффект плавной загрузки или эффект предпросмотра. Это

свойство дает возможность применять сервисы, как с поочередной загрузкой всех кадров, так и сервисы доставки с одновременной загрузкой мультимедиа трафика. При этом в случае внесения случайных ошибок или обрыва связи, а также потере пакета, изображение будет высокого качества, но объект движения будет нечетким. Однако, при успешной загрузке всех кадров, видео-трафик будет восстановлен полностью и высоким разрешением и качеством.

Данная характеристика позволяет добиться качественно новой помехоустойчивости передаваемого битового потока мультимедиа информации, что существенно повлияет на сервисы потоковой доставки и организацию телекоммуникационных сетей в целом.

На основании полученных результатов описан метод адаптивной загрузки видеопоследовательности для сервисов потоковой доставки мультимедиа-сообщений, который помимо вновь предложенного алгоритма компрессии на основе чирплет-разложения сигнала, способен работать с кодеками, основанными как на косинусном, так и на вейвлет-преобразовании.

На серверную часть возлагаются следующие задачи:

1) Определить характер движения с помощью выражения:

$$D = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (|Y_{15}(i,j) - Y_0(i,j)|)}{M \times N \times 255^2 \times 3}, \quad (9)$$

где  $Y(i,j)$  – весовые коэффициенты,  $M$  – количество строк,  $N$  – количество столбцов,  $i$  – координата по строке,  $j$  – координата по столбцу.

2) Аппроксимировать весовые коэффициенты  $K_F$ , несущие информацию о порядке важности кадров, с помощью выражения:

$$K'_F = 1 - (1 - D)F = 1 - F + DF, \quad F = 0,1, \dots, 15$$

$$K_F \begin{cases} K'_F, K'_F > 0, \\ 0, K'_F < 0. \end{cases} \quad (10)$$

3) Включить в файл верхнего уровня информацию о движении объекта и коэффициенты, значения которых определяют характер движения.

Клиентская часть (терминал приема информации) выполняет следующие функции:

- 1) Начать прием информации из файла верхнего уровня группы кадров.
- 2) Начать прием остальных файлов, соответствующим количеству весовых коэффициентов по порядку их значимости. Для каждого принимаемого кадра принять:
 
$$n = \lfloor \log_2(\max_{(i,j)} |Y(i,j)|) \rfloor$$
- 3) Принять координаты  $\eta^{(k)}$  и коэффициенты  $Y(\eta^{(k)})$ , для которых  $2^n < |Y(\eta^{(k)})| < 2^{n+1}$
- 4) Принять  $n$ -й значимый бит остальных коэффициентов  $Y(i,j)$ , для которых  $|Y(i,j)| \geq 2^{n+1}$  (то есть тех коэффициентов, чьи координаты были приняты на раннем этапе).
- 5) Уменьшить шаг  $n$  на 1, перейти на шаг 2), и так – пока не примутся все файлы.
- 6) Свернуть и восстановить видеопоток на основе принятых (или частично принятых) кадров с чирплет-коэффициентами.

Рассмотренный метод позволяет абоненту не только использовать сжатый видеопоток с фиксированной скоростью передачи, но и мобильно изменять скорость прогрессивной загрузки. Предложенный метод дает пользователю работать с терминалом передачи с наилучшим качеством, предоставляя ту часть мультимедиа потока, которая может быть передана при максимальной скорости подключения и высокой помехозащищенности.

Исходя из свойств предложенного алгоритма и метода на его основе, в случае очень плохой помеховой обстановки и низкой скорости абонентского подключения, кодек на основе математического аппарата чирплет-преобразования в состоянии восстановить мультимедийную информацию.

Мультимедийная информация, по большей своей части, содержит основную информацию в области низких частот. Чирплет-преобразование, применимое к временной области мультимедийной информации, переносит информацию, содержащуюся в обрабатываемой группе кадров, в первые два закодированных кадра (фрейма) (первый – это фон, второй – это информация о типе движения). Объединив эти два свойства, кодек на основе чирплет-функций разложения сигнала, позволяет создать высоко помехозащищенный мультимедиа поток.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена разработкам имитационных моделей на основе описанных во второй главе алгоритмов. Данные модели позволяют получить расчеты отношения «сигнал – шум», метрики SSIM «Мера структурного подобия», а также эмитировать прохождение сигнала по беспроводной сети с возникновением различной помеховой обстановки.

Полученные в результате данного исследования, модели позволили на практике показать качественно лучшие характеристики метода передачи, основанного на алгоритме с применением чирплет-преобразования в сравнении с используемым на сегодняшний день алгоритмом, в основе которого лежит математический аппарат косинусного преобразования. Результаты моделирования, основанные на созданных моделях, сведены в таблицы представленные ниже.

В качестве основного параметра оценки качества закодированных мультимедиа данных принято пиковое отношение сигнала к помехе PSNR (Peak Signal to Noise Ratio). PSNR необходимо определять исходя из среднеквадратичного отклонения (MSE), формула 11, которое для двух монохромных изображений  $I$  и  $K$  размера  $m \times n$ , одно из которых считается зашумленным приближением другого.

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |I(i, j) - K(i, j)|^2$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (11)$$

где  $MAX_I$  — максимальное значение, принимаемое пикселем изображения. Когда пиксели имеют разрядность 8 бит,  $MAX_I = 255$ . Вообще говоря, когда значения сигнала представлены линейно с  $B$  битами на значение, максимально возможное значение  $MAX_I$  будет  $2^B - 1$ .

Для цветных изображений с тремя компонентами RGB на пиксель применяется такое же определение PSNR, но MSE считается по всем трем компонентам (и делится на утроенный размер изображения).

Ниже рассмотрена зависимость PSNR, когда кодеку предоставлен не весь поток закодированных кадров, а лишь часть из них. Данные характерные потери особенно распространены в телекоммуникационных

сетях 3G, когда поток прекращается из-за резкой потери скорости. В таблице 1.1 приведены результаты экспериментов.

Таблица 1.1

Обработка при частично принятом количестве кадров (кодирование чирплет-кодером)

Потери	Кадры на входе	Скорость потока	PSNR
0 %	16	512 кбит/с	32,3 дБ
45 %	8	256 кбит/с	26,1 дБ
60 %	4	128 кбит/с	23,7 дБ
80 %	2	64 кбит/с	18,3 дБ

По результатам данных, полученных при имитационном моделировании, согласно таблице 1.1, следует отметить что, не смотря на потери во время передачи, отношение «сигнал – шум» остается в пределах от 15 до 40 дБ, и кодек в состоянии восстановить видеопоследовательность.

В таблицах 1.2, 1.3 приведены результаты восстановления видеосигналов при различных внесенных ошибках в процессе передачи по цифровой беспроводной сети, полученные нами на основе чирплет-преобразования. Кроме того, в таблицах приведено сравнение с широко распространёнными коммерческими кодеками – MPEG-4, DivX511, H.263, в основе которых лежит математический аппарат косинусного преобразования.

Таблица 1.2

Помехоустойчивость при случайных внесенных ошибках во время передачи мультимедиа информации

Фрагмент	Случайная внесенная битовая ошибка	PSNR				
		DivX511	MPEG-4	H.263	Вейвлет	Чирплет
2	$10^{-2}$	17,3 дБ	18,0 дБ	18,7 дБ	25,2 дБ	27,0 дБ
3		22,4 дБ	22,7 дБ	21,1 дБ	27,7 дБ	29,3 дБ
2	$10^{-3}$	24,5 дБ	24,5 дБ	22,9 дБ	28,2 дБ	29,5 дБ
3		27,1 дБ	21,8 дБ	24,6 дБ	30,5 дБ	30,7 дБ
2	$10^{-4}$	32,2 дБ	31,4 дБ	28,9 дБ	31,5 дБ	31,4 дБ
3		32,6 дБ	30,4 дБ	27,8 дБ	33,0 дБ	34,0 дБ

Разработанный алгоритм компрессии мультимедиа информации показал высокую помехоустойчивость в сравнении с алгоритмами, основанными на математическом аппарате косинусного преобразования, и при этом показал высокую степень компрессии данных, при сопоставимом уровне качества.

Таблица 1.3

Оценка помехоустойчивости при полной потере пакета кадров

Фрагмент	Размер потери пакета	PSNR				
		DivX511	MPEG-4	H.263	Вейвлет	Чирплет
2	128 байт	15,1 дБ	13,1 дБ	13,7 дБ	24,1 дБ	26,3 дБ
3		17,3 дБ	15,6 дБ	15,7 дБ	26,7 дБ	28,3 дБ
2	64 байт	21,0 дБ	25,1 дБ	19,6 дБ	27,4 дБ	28,9 дБ
3		24,5 дБ	25,3 дБ	22,2 дБ	29,2 дБ	30,0 дБ
2	16 байт	27,1 дБ	29,3 дБ	27,6 дБ	32,4 дБ	32,7 дБ
3		29,5 дБ	31,5 дБ	29,0 дБ	36,3 дБ	37,7 дБ

Результатом таблиц 1.2, 1.3 является тот факт, что при потере пакета и внесении случайной битовой ошибки, PSNR лучше у кодеков на основе вейвлет- и чирплет-преобразования, при субъективно одинаковой оценки воспроизводимого изображения.

Из-за сложности получения субъективной оценки для сравнительного анализа изображений была выбрана количественная сравнительная оценка качества SSIM. Сравнительная мера оценки качества «Мера структурного подобия» (англ. SSIM – structural similarity, формула (12) и (13)), была предложена для сравнения полутоновых изображений, на данный момент является одной из самых прогрессивных. Она основана на измерении трёх параметров: яркости, контраста и структуры.

$$SSIM = \left( \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_y \sigma_x} \right) \left( \frac{2\overline{XY}}{(\overline{X})^2 + (\overline{Y})^2} \right) \left( \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_y^2 + \sigma_x^2} \right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \overline{X} &= \frac{1}{nm} \sum_{i=1, j=1}^{m,n} x_{ij}, \overline{Y} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1, j=1}^{m,n} y_{ij}, \sigma_x^2 = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1, j=1}^{m,n} (x_{ij} - \overline{X})^2, \\ \sigma_y^2 &= \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1, j=1}^{m,n} (y_{ij} - \overline{Y})^2, \sigma_{xy}^2 = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1, j=1}^{m,n} (x_{ij} - \overline{X})(y_{ij} - \overline{Y}) \end{aligned} \quad (13)$$

Чем выше значение SSIM, тем больше совпадают сравниваемые изображения. В последнее время данная мера широко используется в силу того, что она наилучшим образом учитывает особенности восприятия изображения человеческим глазом. Данные расчета SSIM, сведены в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

Оценка меры восстановленного изображения относительно исходного

	DivX511	MPEG-4	H.263	Вейвлет	Чирплет
SSIM	0,7	0,72	0,75	0,86-0,88	0,85-0,90

Как видно из таблицы 1.4, наилучшие результаты по сравнению изображений имеют вейвлет- и чирплет-преобразования, в виду адаптивности и наличия КИХ-фильтров, при том что уровень качества сжатых изображений примерно одинаков.

**В четвертой главе** диссертационной работы изложены практические результаты проведенного исследования. Разработаны кодеки компрессии и восстановления мультимедиа информации, использующие математический аппарат чирплет-преобразования на языках Verilog (для ПЛИС) и C++ (для микропроцессоров с процессорным ядром ARM).

На отладочных комплексах были проведены эксперименты с разработанным кодеком и уже созданными классическими кодеками.

Таблица 1.6

Время восстановления закодированного кадра

Разрешение	MPEG-4	H.263	Вейвлет	Чирплет
266x200	27	34	19	17
420x380	38	51	23	22
640x480	74	130	40	34
800x600	92	248	66	58

Необходимо отметить, что компрессия кадра видеопоследовательности проводилась на полно-цветном 24-битном изображении с различным разрешением.

В таблице 1.6 отображено время восстановления одного кадра закодированной видеопоследовательности. Наряду с другими преобразованиями кодек на основе чирплет-функции имеет наименьшее время декодирования. Это достигается в первом варианте за счет простых математических операций, а во втором, для изображений статического разрешения (формата) – за счет матрицы преобразования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В итоге выполнения диссертационной работы были получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Предложен метод и алгоритм сжатия мультимедиа сообщений для высокопроизводительных телекоммуникационных систем, использующий для компрессии информации математический аппарат чирплет-преобразования, позволивший сократить информационную плотность потока на 20%;
2. Полученные результаты позволили создать прогрессивный метод загрузки и обработки мультимедиа информации для телекоммуникационных систем потоковой доставки на основе предложенного алгоритма компрессии. Полученный метод позволил увеличить помехозащищенность канала в 2,5 раза и сократить время обработки мультимедиа данных в 2 раза;
3. Разработаны модели, позволяющие оценить существующие и предложенные алгоритмы компрессии мультимедиа информации по беспроводной сети с учетом помех и проводить анализ на основе рассчитанных PSNR (отношения сигнал-шум) и метрики SSIM (мера структурного подобия);
4. Разработаны и апробированы библиотеки функций, кодеки компрессии и восстановления мультимедиа информации, для ПЛИС и микропроцессоров.

Разработанный алгоритм компрессии мультимедиа информации использован в обработке информации для целевой аппаратуры КА разработки ОАО «ИСС им. академика Решетнева» и ОАО «НПК Системы прецизионного приборостроения».

Полученные результаты подтверждают правильность выбранных направлений научных исследований, адекватность предложенных методов и

алгоритмов для улучшения характеристик сервисов потоков доставки мультимедиа сообщений в беспроводных телекоммуникационных системах третьего и четвертого поколения. Результаты показали полную работоспособность полученных методик, пригодность к эксплуатации и внедрению разработанных программных библиотек (кодеков). Таким образом, можно с уверенностью констатировать **факт достижения поставленной цели данной работы.**

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Из списка изданий, рекомендованных ВАК:**

1. Тульский И. Н. Возможность использования чирплет-преобразования для компрессии аудио- и видеоинформации в беспроводных радиосетях // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010.–Т. 6, № 4. –С. 46-51.
2. Тульский И. Н. Новые возможности современных радиосетей типа 3G и 4G при использовании альтернативных методов компрессии мультимедийной информации // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева.–2011. –№ 2.–С. 71-76.
3. Тульский И. Н. Середкин В. Г. Альтернативные алгоритмы сжатия аудио- и видеоинформации в беспроводных радиосетях // В мире научных открытий. –2010. –№4, Часть 13.–С. 145-147.

### **В других печатных изданиях:**

1. Тульский И. Н. Возможность использования альтернативных методов для компрессии аудио- и видеоинформации в каналах космической связи // Сборник трудов конференции «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике». – Королев, 2010. –Часть 2, –С. 32-33.
2. Тульский И. Н. Улучшение сервисов потоковой доставки мультимедиа сообщений // Труды десятой научно – практическая конференция «Интеллект и наука» Филиал ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» в г. Железногорск. – Железногорск, 2010. –Часть 1, –С. 55-57.
3. Тульский И. Н. Возможность применения чирплет-преобразования для улучшения сервисов потоковой доставки мультимедиа сообщений. //

Научный журнал «Новый Университет». – Йошкар-Ола. –2011.–№6.–С. 102–105.

4. Тульский И. Н., Середкин В. Г. Сравнительные характеристики кодека, на основе чирплет-преобразования, для компрессии мультимедийной информации с кодеками на основе математического аппарата Фурье и вейвлет-преобразования //«Наука и техника XXI века»: материалы международной научно практической конференции. – Новосибирск.–2011г.– С. 94-99.

5. Тульский И. Н. Математический аппарат чирплет-преобразования для материалов восьмой молодёжной международной научно-практической конференции «Интеллектуальный потенциал XXI века: Ступени познания». – Новосибирск. –2011г.–С. 189-192.