

ЦИФРОВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ В МОБИЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Более 40 лет прошло, как фантазия Артура Кларка о системе связи через спутник на геостационарной орбите воплотилась в реальность. С тех пор технологии спутниковой связи постоянно развиваются и совершенствуются. Уже лет семь как они стали вполне доступными и для конечного пользователя, превратившись из чрезвычайно дорогих эксклюзивных решений в средство абонентского доступа. Но это превращение основано на ряде технологических прорывов, один из которых – применение цифровых антенных решеток, цифровое формирование диаграммы направленности антенн.

Особенность современных спутниковых систем мобильной связи (ССМС) – это развертывание региональных систем, нацеленных, в отличие от прежних глобальных проектов (Inmarsat, Iridium, GlobalStar), на обслуживание отдельных районов земной поверхности [1]. Такие не столь амбициозные по замыслу ССМС, опираясь на новейшие технологии, более привлекательны для инвесторов и под силу не только гигантам корпоративного мира, но и компаниям со сравнительно небольшими капиталами. Причем подавляющее большинство современных связных геостационарных спутников разрабатывается на основе технологии цифровых антенных решеток (ЦАР). Реализуемые в них методы цифрового диаграммообразования (ЦДО) – это сравнительно новое направление не только в технике космического аппаратостроения, но и в наземной инфраструктуре спутниковой связи.

За рубежом в 90-е годы прошлого века интенсивно патентовались технологии ЦАР применительно к спутниковым приложениям. В частности, в патентах США [1, 2] зафиксиро-

рованы концептуальные аспекты построения спутниковых систем связи (ССС) с использованием методов многолучевого ЦДО. В качестве преимуществ цифрового формирования лучей отмечены [1]:

- высокая гибкость в применении различных методов обработки сигналов без потерь в отношении сигнал-шум;
- большая степень свободы в выборе формы и направлений фокусировки лучей, обеспечиваемая программной сменой весовых коэффициентов фазирования;
- возможность нацеливания парциальных лучей на индивидуальных пользователей или их пространственно-сосредоточенные группы, что обеспечивает максимальную производительность всех каналов связи;
- адаптивное формирование лучей, позволяющее повысить помехозащищенность радиолиний путем синтеза глубоких провалов ("нулей") в диаграмме направленности антенной решетки в секторе действия активных помех, а также обеспечить устойчивость функционирования наземного

сегмента системы в условиях многолучевого распространения радиоволн;

- ЦДО предусматривает выполнение цифровой калибровки характеристик антенной системы в реальном времени, что позволяет контролировать и компенсировать любые паразитные изменения амплитуды и фазы сигналов по трассе распространения между приемо-передатчиками, а также применять крупноапертурные антенные решетки при высоких градиентах изменения температуры по их раскрытию;
- возможность дистанционного программного реконфигурирования архитектуры, модернизации методов обработки сигналов и режимов функционирования системы без внесения аппаратных изменений в бортовое оборудование после запуска спутника.

ПРОЕКТ THURAYA

Одним из примеров практической реализации указанного подхода явилась система Thuraya (www.thuraya.com), введенная в эксплуатацию летом 2001 года компанией Thuraya Satellite Telecommunications (Объединенные Арабские Эмираты). На тот момент космический сегмент системы был представлен единственным геостационарным спутником Thuraya-1 (рис.1), размещенным в позиции 440° в.д. [3]. Космический аппарат (КА) был выведен на орбиту в октябре 2000 года с известной платформы Sea Launch ("Морской старт"). Полная проектная мощность системы Thuraya рассчитана на обслуживание 1,75 млн. абонентов в регионах, охватывающих территорию примерно между 20° з.д. и 100° в.д., и между 60° с.ш. и 2° ю.ш. В общей сложности это пространство включает 99 стран Азии, Европы и Африки, в том числе часть России и Украину.

В первоначальной конфигурации система была способна обслуживать до 235 тыс. абонентов, поэтому именно столько мобильных терминалов выпустили для этой системы фирмы Hughes Network Systems (США) и Ascom (Швейцария). Стоимость аппаратов у изготовителей не превышала 800 долл. Конструкция пользовательских терминалов явилась довольно непривычной для традиционных ССМС (рис.2). Она скорее напоминала обычную малоразмерную телефонную трубку и при массе 200 г имела габариты $14 \times 5 \times 2,5$ см. Размер двухчастотной антенны L-диапазона удалось снизить, закрутив ее в цилиндрическую спираль. При этом телефонные аппараты Thuraya работали в диапазонах GSM 900 МГц, а также на частотах спутникового канала 1525–1559 / 1626,5–1660,5 МГц при приеме / передаче.

В 2006 году появились абонентские терминалы Thuraya второго поколения. В частности, модель Thuraya SO-2510 стала самым миниатюрным аппаратом спутниковой связи – масса 130 г при габаритах $11,8 \times 5,3 \times 1,9$ см (www.thuraya.com).

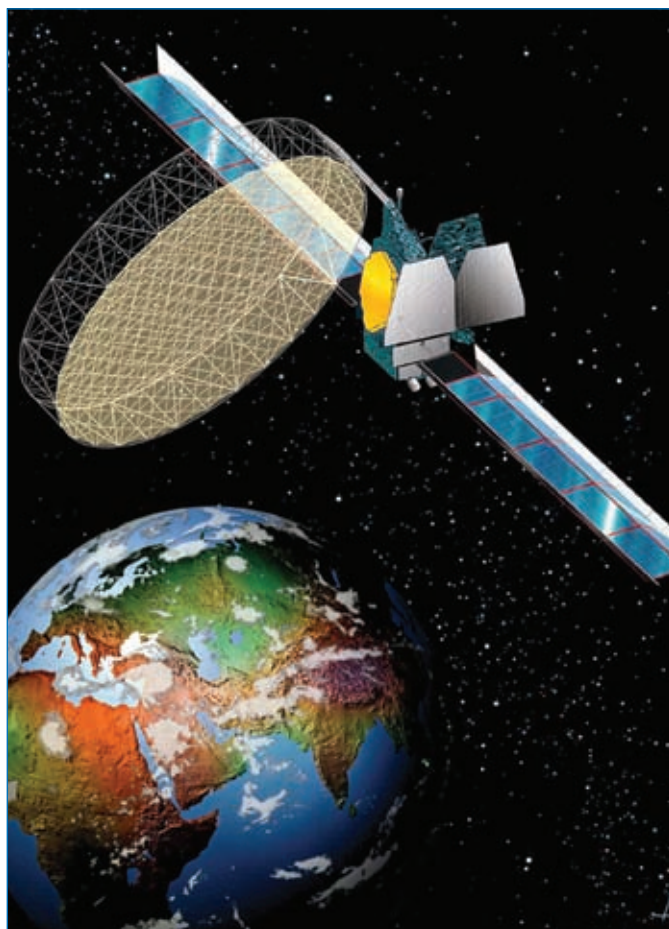


Рис.1 КА Thuraya-1

Первый спутниковый смартфон Thuraya SG-2520 при несколько больших массогабаритных показателях (масса 170 г), поддерживает уже три диапазона частот сотовой связи GSM (900, 1800 и 1900 МГц). Компактность, а также ограничение максимальной средней мощности излучения передатчиков на уровне 2 Вт (подобно терминалам GSM 900) достигнуты благодаря ряду принципиально новых для ССС технических решений, реализованных на борту космического аппарата.

Ключевым среди них является использование приемо-передающей ЦАР, в которой выполняется цифровое формирование лучей (ЦФЛ) диаграммы направленности (ДН) [3]. 128 активных дипольных элементов L-диапазона позволяют формировать одновременно 250–300 лучей (в соответствии с численностью наземных сот). ЦФЛ сегодня – единственная технология, позволяющая эффективно реализовать динамическую адаптацию обслуживаемой зоны покрытия на основе оперативного перенацеливания цифровых приемо-передающих лучей по наземным ячейкам при изменении нагрузки и для оптимизации двунаправленного трафика [3]. Созвездие лучей, синтезируемое, например, по алгоритмам быстрого преобразования Фурье либо посредством классических процедур дискретного Фурье-анализа, является, по сути, совокупностью "пространственно-частотных фильтров". Каждый



Рис.2 Пользовательский терминал системы Thuraya первого поколения

из них обеспечивает селекцию строго определенного набора сигналов и подавляет остальные как помеховые.

Для реализации такой идеологии потребовалось существенно пересмотреть традиционные технические решения, использовавшиеся ранее при создании фазированных антенных решеток (ФАР). В отличие от схемотехники ФАР, в каждом приемном канале ЦАР вместо фазовращателей устанавливаются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) (рис.3) [4]. В приемных каналах (рис.3а) предусмотрено аналоговое формирование квадратурных составляющих принятых сигналов с оцифровкой каждой из квадратур отдельным АЦП. При этом тактирующие сигналы на все АЦП поступают от единого задающего генератора, чтобы все преобразователи по раскрытию ЦАР срабатывали синхронно.

Совокупность цифровых отсчетов напряжений многосигнальной смеси поступает на процессор диаграммообразования, ориентирующий максимумы лучей ("вторичных каналов") по координатам центров наземных сот. Тем самым производится первичная пространственная селекция абонентов сообщений. Полученные отклики вторичных каналов далее независимо обрабатываются множеством канальных процессоров, осуществляющих выделение каналов с переменной полосой пропускания, квадратурно-фазовую демодуляцию сигналов и декодирование сообщений по традиционным стандартам TDMA/FDMA (именно такие приняты для обмена в системе Thuraya). Фактически функционирование канальных процессоров мало отличается от алгоритмов работы обычных базовых станций мобильной связи – с той лишь разницей, что отсчеты сигналов поступают не в темпе аналого-цифрового преобразования (десятки-сотни мегагерц), а с интервалом, необходимым для выполнения операций ЦФЛ (сотни ки-

логерц). Для согласования темпов ЦДО с периодом дискретизации АЦП обычно применяют цифровые фильтры-дециматоры, накапливающие в жестко отведенных интервалах времени отсчеты сигналов, полученные с выходов АЦП. Помимо прореживания информационного потока без потерь в энергетике такой принцип обработки позволяет декоррелировать шумы, осуществлять дополнительную частотную селекцию, повысить отношение сигнал-шум за счет когерентного суммирования напряжений сигнальной смеси. Синтез лучей путем их взвешенного фазированного суммирования сопровождается наращиванием мгновенного динамического диапазона системы: для 128-элементной антенной решетки Thuraya

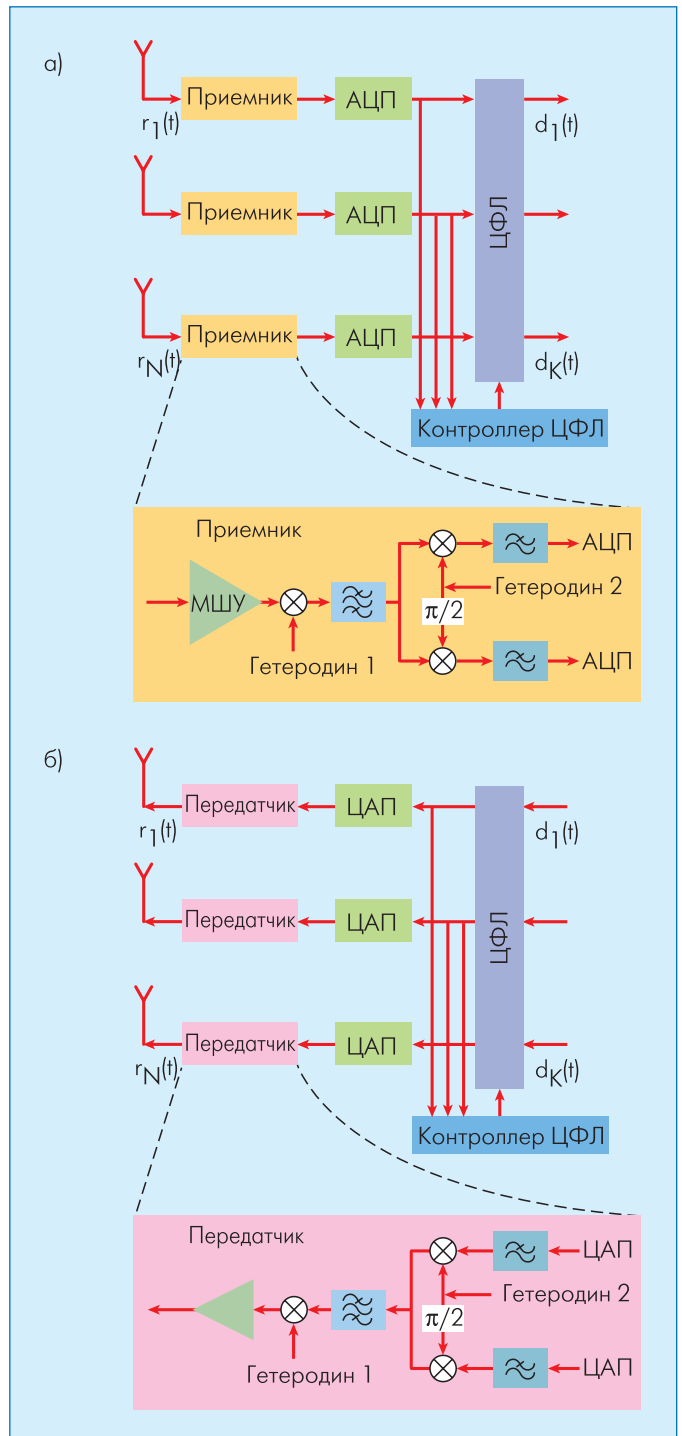


Рис.3 Приемный (а) передающий (б) сегменты ЦАР

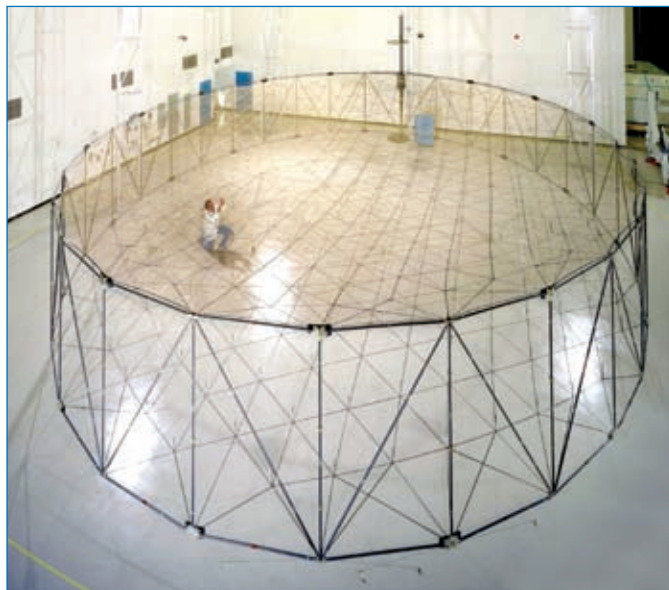


Рис.4 Приемно-передающая антенная решетка на сборке

этот прирост потенциально может составлять $10 \lg 128 \approx 21$ дБ по мощности. Это позволяет достигать высокой помехозащищенности и качества связи.

Во многом схожие процессы, только в обратном порядке, происходят и при работе ЦАП на передачу (рис.3б). Передаваемые сигналы после квадратурно-фазовой модуляции в канальных процессорах в цифровом виде кодируются по механизмам TDMA/FDMA. Далее они поступают на процессор ЦФЛ, формирующий цифровой образ результирующего амплитудно-фазового распределения электромагнитного поля по раскрытию ЦАР, соответствующего заданной пространственной ориентации лучей ДН. Комплексные отсчеты цифровых напряжений сигналов с выхода процессора ЦФЛ подаются на ЦАП. После смещения по частоте и усиления по мощности преобразованные в аналоговый вид сигналы ЦАП поступают на питающие зажимы антенных элементов и излучаются в пространство. При работе на общую приемно-передающую антенну (как на борту Thuraya-1) приемный и передающий сегменты подключают к антенным элементам через коммутаторы.

Отметим, что достоверной информации о схемотехнике бортовой аппаратуры КА Thuraya нет. Тем не менее однозначная трактовка термина digital beamforming среди специалистов в области обработки сигналов, а также комментарии фирмы Boeing (основного подрядчика-изготовителя КА) к концепции построения телекоммуникационных КА (www.boeing.com/defense-space/space/bss/dsp/digiprocessor.pdf) позволяют утвердиться в приверженности разработчиков Thuraya именно к представленным на рис.3 схемотехническим решениям. Это же подтверждает и сравнительно малое число (128) антенных элементов решетки (чем их меньше, тем проще реализовать ЦФЛ в реальном времени), а также достаточно низкая скорость обмена по каналам "Земля-спутник", соответствующая темпам ЦДО, и наличие на борту КА непомерно мощного процессорного модуля обработки сигналов.

Подробнее остановимся на особенностях конструкции антенной решетки спутников семейства Thuraya (рис.4). Ее габариты – $16 \times 12,25$ м [3]. Сама несущая конструкция (рефлектор) изготовлена компанией TRW Astro Aerospace по запатентованной AstroMesh-технологии (рис.5) [5] из теплоустойчивого графито-композитного материала, делающего столь громоздкое сооружение в меру прочным и легким (78 кг). При подготовке спутника к запуску антенная решетка укладывалась в компактный модуль высотой 3,8 м и диаметром 1,3 м благодаря трубчатой конструкции с шарнирно-троссовыми сочленениями. На орбите по команде с Земли рефлектор разворачивается до штатных размеров с помощью сжатого газа, заполнившего контуроформирующий торроидальный баллон из эластичного кевлароподобного материала (рис.6). Особенность AstroMesh-технологии – полная индифферентность геометрии развернутого рефлектора к изменению объема и формы газонаполненного баллона из-за вариаций температуры. Это позволяет избежать ошибок формирования луча, вызванных случайными деформациями полотна решетки.

Подробнее остановимся на специфике конструкции бортового вычислительного комплекса (БВК), установленного на КА Thuraya. Как отмечалось в многочисленных публикациях, DSP-процессор Thuraya спроектирован специалистами компании Boeing Satellite Systems (BSS) и изготовлен корпорацией IBM. На день запуска КА это был самый мощный в мире БВК среди всех эксплуатировавшихся на спутниках связи. Его производительность эквивалентна быстрдействию 3000 компьютеров с лучшими для того времени процессорами Pentium III и в пять раз превосходила производительность предыдущей модели БВК на КА корпорации Boeing.

Основой БВК явилась микроэлектронная технология IBM изготовления интегральных схем (ИС). Эти ИС представляют собой первый опыт применения коммерческого технологического процесса SA-12 с топологическим разрешением 0,18 мкм в космических программах. В результате задержка сигналов на одном логическом блоке (ЛБ) составила 0,05 нс, а удельная рассеиваемая мощность ЛБ не превысила 0,1 мВт/МГц. Всего 17 месяцев потребовалось специалистам Boeing и IBM для проектирования, изготовления и тестирования девяти различных типов специализированных ИС (ASIC), каждая из которых содержала до 3,8 млн. ЛБ. 100%-ная работоспособность готовых изделий позволила запустить спутник в рекордные сроки – уже через 24 месяца после официального начала проекта.

Наряду с выполнением операций ЦФЛ и многоканальной обработки сигналов процессорный модуль Thuraya-1 в состоянии одновременно обеспечить межлучевую коммутацию более 25 тыс. дуплексных каналов (по некоторым данным, 13750 каналов). Кроме того, на него возложены задачи телеметрии и поддержки связи по служебным каналам с наземным центром спутникового обеспечения, расположенным в г.Шаржа (ОАЭ), а также региональными шлюзами. Под слу-

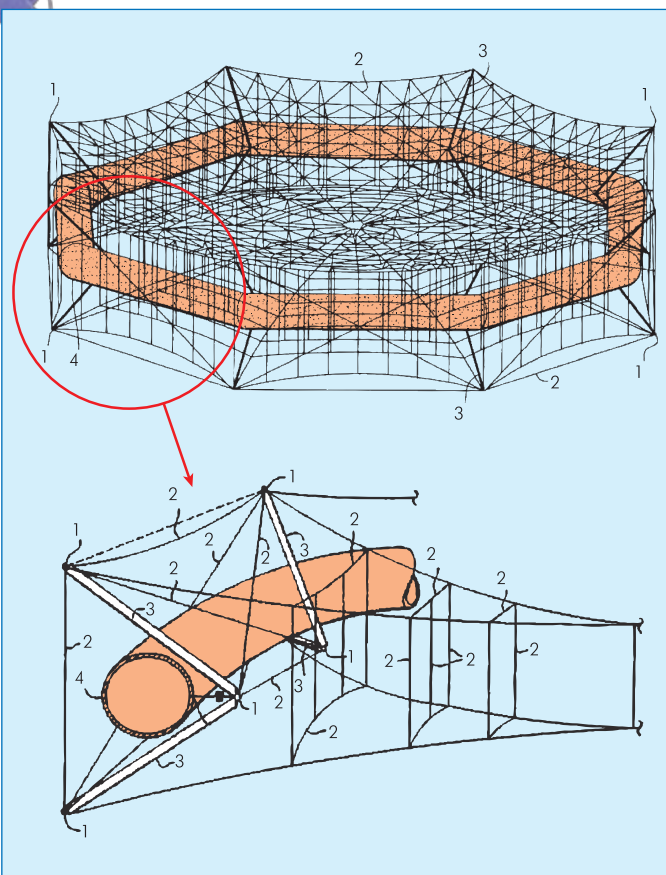


Рис.5 Несущая конструкция антенной решетки [5]:
1 – шарниры; 2 – тросы; 3 – трубчатые балки; 4 – газонаполненный контуроформирующий баллон

жебные каналы отведена пара частотных полос (6425–6725 / 3400–3625 МГц для восходящего (на спутник) / нисходящего каналов). Они предназначены, в частности, для управления развертыванием ЦАР и тестово-интеграционными процедурами, а также для директивной ориентации лучей ДН. Для этих каналов используется дополнительная зеркальная антенна диаметром 1,25 м.

Наличие на борту мощной вычислительной среды и необходимость работы с наземными пользователями посредством малогабаритных ручных терминалов потребовали значительно повысить энергопотенциал источника бортового электропитания. В качестве такового используются две GaAs-солнечные батареи, суммарная мощность которых в начале эксплуатации превышала 13,5 кВт с проектным снижением до 11 кВт в конце срока работы спутника (12 лет). Данные энергетические параметры довольно нетрадиционны для спутниковых систем связи, энерговооруженность которых прежде обычно не превышала 5 кВт [3]. Неслучайно до сих пор ССМС не могли успешно конкурировать с альтернативными стратосферными проектами, ориентированными на использование высотных дирижаблей (SciSat) либо барражирующих самолетов.

Именно значительный энергетический потенциал нисходящих в сторону наземных абонентов сигналов и высокая чувствительность приемного сегмента бортовой ЦАР позволили в проекте Thuraya отказаться от громоздких антенных

систем, устанавливаемых обычно на терминалах наземных пользователей.

Помимо решения сугубо связанных задач, в проекте Thuraya предусмотрена возможность определения местоположения абонентов с помощью сигналов системы GPS, автоматической коммутации пользователей с космического канала связи на местные GSM-линии и обратно, если пользователь оказывается вне зоны покрытия сотовой сети. Услуги Thuraya (как и любой другой ССМС) предназначены для использования вне зданий, однако благодаря мощной передающей ЦАР Thuraya позволяет абонентам внутри помещений принимать предупредительные сигналы о необходимости выйти наружу для возобновления работы по космическому каналу. На территории многих стран связь со спутником возможна и из салонов автомобилей (см. www.thuraya.com), хотя для этих целей разработчики рекомендуют использовать специальный адаптер VDA (Vehicular Docking Adapter).

Говоря о многофункциональности проекта Thuraya, отметим и ряд его пока нереализованных потенциальных возможностей. Согласно [6], Thuraya-1 можно использовать как радиовещательный спутник. Высокая мощность излучения бортового передатчика и адаптивное цифровое диаграммообразование позволяют организовать вещание в режиме

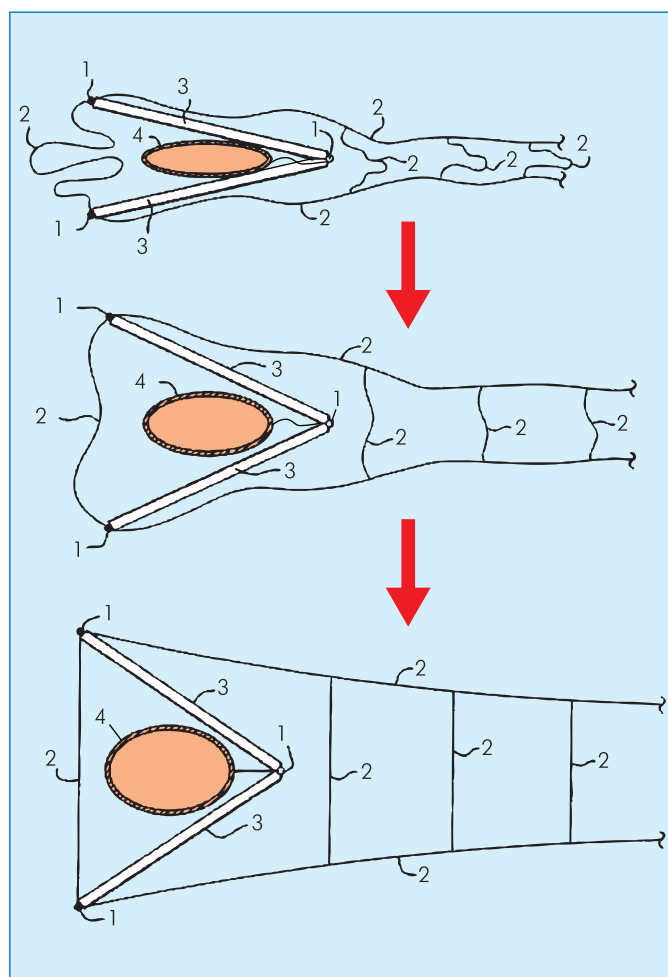


Рис.6 Развертывание антенной системы:
1 – шарниры; 2 – тросы; 3 – трубчатые балки; 4 – газонаполненный контуроформирующий баллон

"точка-область" (а не "точка-точка", как сейчас), расходя на это только часть общей энергетики цифровых лучей.

Другим интересным применением проекта Thuraya может стать трансляция дифференциальных поправок системам спутниковой навигации от корректирующих станций службы регионального спутникового радионавигационного дополнения (РНД) [6]. Многие пользователи спутниковых радионавигационных систем (СРНС) нуждаются в мониторинге навигационных полей в зоне их применения, ретрансляции сигналов дифференциальных поправок для GPS и оповещения пользователей о непригодности GPS-сигналов для решения задач местоопределения. Служба РНД вырабатывает сигналы дифференциальных поправок вместе с информацией о достоверности, целостности и надежности обсервации созвездий навигационных спутников. Для трансляции этих данных обычно используется геостационарный КА, видимый в данном регионе.

Для приема сигналов РНД пользователям достаточно иметь специальный (служебный) узкополосный приемный канал с фильтрацией потока данных РНД со скоростью не более 600–900 бод. Службы РНД уже действуют в США (WAAS – Wide Area Augmentation Service) и в Европе (EGNOS). Последняя использует "Inmarsat-3", аренда ресурсов которого для трансляции РНД обходится слишком дорого. Поскольку вступление в службу EGNOS для многих стран отдалено во времени или невозможно, трансляция информации РНД через Thuraya-1 может восполнить для национальных пользователей СРНС существующий вакуум РНД-услуг.

Своим появлением система Thuraya фактически составила серьезную конкуренцию в обслуживаемой зоне глобальным ССМС Inmarsat и Globalstar. В частности, в отличие от проекта Globalstar абонент Thuraya, находясь вне сети GSM, может общаться с другими абонентами за пределами досягаемости наземной сотовой связи напрямую через спутник. В Globalstar в подобных случаях требовалось, чтобы один из двух соединяющихся абонентов обязательно находился в зоне действия наземного ретранслятора (так называемый принцип "согнутой трубы").

Что касается системы Inmarsat, то единственное ее преимущество перед Thuraya на момент запуска спутника Thuraya-1 сводилось к наличию режима передачи данных со скоростью до 64 кбит/с. Однако такой режим предполагает использование специального портативного терминала с плоской антенной решеткой, стоимость которого превышала 10 тыс. долл. (см. например, Capsat Messenger TT-3080A [7]). К тому же, тариф на такую услугу составляет обычно более 7 долл./мин. Между операторами Inmarsat и Thuraya был подписан Меморандум о взаимопонимании (MoU), согласно которому в системе Thuraya-1 будет осваиваться ряд режимов Inmarsat со скоростями передачи данных 64 кбит/с. Также исследуется возможность совместной реализации скорости передачи 144 кбит/с в интересах качественной

трансляции видеоконференций и обеспечения комфортного доступа в Интернет. Для передачи данных на таких скоростях абонентские терминалы Thuraya вместо коротких спирально-штыревых антенн должны оснащаться малогабаритными полосковыми антенными решетками (подобно упомянутому Capsat Messenger TT-3080A), направляемыми на спутник. Учитывая высокую энергетику Thuraya, можно рассчитывать, что подобные антенны будут меньших размеров, чем в аналогичных терминалах Inmarsat.

Перечисленные нетрадиционные применения системы Thuraya потенциально придают дополнительный запас прочности проекту, позволяя надеяться на его длительное функционирование. После Inmarsat, избежавшего банкротства путем постоянного обновления спутникового парка, у Thuraya есть все шансы стать второй по счету стабильно функционирующей системой спутниковой связи в мире.

Дальнейшее развитие система Thuraya получила 10 июня 2003 года с запуском второго геостационарного спутника (Thuraya-2). Первоначально он размещался в позиции 28,5° в.д. для проведения орбитальных испытаний, после чего был перемещен в точку стояния 44,0° в.д. взамен Thuraya-1, которого перевели в район 98,5° в.д. КА Thuraya-1 так и не был запущен повторно в коммерческую эксплуатацию, а использовался для испытаний спутниковой связи в азиатско-тихоокеанском регионе и тестирования новых телефонных трубок, разработанных в Южной Корее. По результатам испытаний 15 января 2008 года был запущен третий КА Thuraya-3 и размещен на геостационарной орбите в позиции 98,5° в.д.

Продолжение следует.

ЛИТЕРАТУРА

1. US Patent 6556809. Method and apparatus for controlling communication beams within a cellular communication system. Приоритет от 22.11.1999 года.
2. US Patent 6016124. Digital beamforming in a satellite communication system. Приоритет от 6.04.1998 года.
3. **Слюсарь В.И.** Фазированная антенная решетка системы Thuraya. – Сети и телекоммуникации, 2002, № 5, с. 54–58.
4. **Слюсар В.И.** Thuraya-1 сквозь призму технических новшеств. – Телемультимедиа, 2001, № 5(9), с. 13–18.
5. US Patent 5990851. Space deployable antenna structure tensioned by hinged spreader-standoff elements distributed around inflatable hoop. Приоритет от 16.01.1998 года.
6. **Липатов А.А., Федорова Т.М., Скорик Е.Т.** Комплексное использование геостационарного спутника подвижной связи нового поколения Thuraya. – Материалы 11-й Международной крымской микроволновой конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (CriMiCo"2001), 10–14 сентября 2001 года.
7. Capsat Messenger TT-3080A. User Manual. – Thrane & Thrane A/S, 2000, www.networkinv.com/data/uploads/PDF/support/TT-3080A_mn.pdf.