

**А. М. Сомов
С. Ф. Корнев**

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

*Допущено УМО по образованию
в области информационной безопасности
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 090106
– «Информационная безопасность
телекоммуникационных систем»*

**Москва
Горячая линия - Телеком
2012**

УДК 621.396.946
ББК 32.884.1
С61

Сомов А. М., Корнев С. Ф.

С61 Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов / Под ред. А. М. Сомова. – М.: Горячая линия–Телеком, 2012. – 244 с.: ил. ISBN 978-5-9912-0225-1.

Рассмотрены принципы построения спутниковых систем связи и их составных частей. Приведены основные понятия, термины и параметры, виды служб. Освещены вопросы электромагнитной доступности и надёжности, виды помех. Анализируются методы и виды многостанционного доступа, виды модуляции и помехоустойчивого кодирования, а так же принципы действия современных спутниковых модемов. Описаны способы сжатия сигналов для сокращения информационной избыточности, приведены особенности и перспективы развития спутниковых сетей VSAT. Рассмотрены особенности мобильных спутниковых систем связи и общие технологии формирования цифровых потоков информации, особенности цифрового спутникового телевидения. Приведены основные энергетические соотношения на линии связи для спутников с использованием геостационарной орбиты.

Для студентов, обучающихся по специальности 090106 – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», будет полезна студентам телекоммуникационных и радиотехнических специальностей, аспирантам и специалистам в области инфокоммуникаций и защиты информации.

ББК 32.884.1

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

**Сомов Анатолий Михайлович
Корнев Сергей Филиппович**

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Учебное пособие

Книга подготовлена при поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ-24.2010.10

Редактор Ю. Н. Чернышов
Компьютерная верстка Ю. Н. Чернышова
Обложка художника В. Г. Ситникова

Подписано в печать 25.10.2011. Печать офсетная. Формат 60×88/16. Уч. изд. л. 15,25. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-9912-0225-1

© А. М. Сомов, С. Ф. Корнев, 2011

© Издательство Горячая линия–Телеком, 2011

Введение

Тенденция развития мировой сети электросвязи обусловлена переходом человеческого общества от индустриальной фазы развития к информационной и характеризуется интеграцией и конвергенцией телекоммуникационных сетей. Эта тенденция стала проявляться еще в конце прошлого столетия, когда системы связи стали переходить на цифровые формы передачи информации. Произошло слияние связанных и информационных технологий, которое послужило толчком к объединению и взаимному проникновению структур сетей и систем связи с универсализацией предоставляемых абонентам услуг. Развитие технологий связи привело к созданию глобальных сетей для передачи больших объемов информации с высокой скоростью и надежностью. Следствием этого стало перераспределение международного телекоммуникационного трафика между системами связи.

Основным способом реализации глобальной и региональных сетей связи стало применение оптоволоконных кабелей и спутниковых систем связи. Несмотря на внедрение оптоволоконных линий, спутниковые системы связи продолжают играть важную роль в качестве важного дополнения к наземным первичным сетям связи на основе волоконно-оптических линий связи.

В настоящее время на объем трафика спутниковых линий связи приходится около четверти общего мирового трафика.

В ближайшие годы предполагается постоянный рост числа задействованных ретрансляторов спутниковой связи примерно на 3...6 % в год, причем более быстро будет возрастать доля ретрансляторов, используемых для передачи Интернет-трафика.

Активно продолжается внедрение сетей спутниковых терминалов с малыми размерами антенн (VSAT), что приводит к общему увеличению числа терминалов в мире. Одновременно происходит постоянное наращивание числа ИСЗ, использующих ретрансляторы Каддиапазона частот (20/30 ГГц), кроме того, в ближайшие годы следует ожидать появления ИСЗ диапазона частот 40/50 ГГц.

В настоящее время широко используется спутниковый телевизионный стандарт DVB-S, однако более перспективен и уже находит применение новый стандарт DVB-S2, который является преемником и дальнейшим развитием стандарта DVB-S. Стандарт DVB-S2 используется для трансляции услуг, которые не могут быть реализованы традиционными методами, например ТВ сигналов, компрессированных в новых форматах или передаваемых с высоким разрешением HD

или 3D. В спутниковые системы связи активно внедряются интегрированные современные телекоммуникационные технологии на основе транспортных протоколов MPEG-2 и IP/DVB, обеспечивающие не только цифровое вещание, но и передачу данных, телефонию и доступ в Интернет.

Создание систем подвижной и персональной спутниковой связи (СПСС), интегрированных с наземными сетями связи, стало определяющей тенденцией развития технологий связи в начале XXI века. Развитие технологий СПСС осуществляется совместно с технологиями наземной подвижной связи третьего (3G) и в перспективе четвертого (4G) поколения. Абонентам предоставляется широкий спектр телекоммуникационных услуг: речевая и пейджинговая связь, передача данных, определение местоположения, возможность доступа в Интернет и, в перспективе, услуги мультимедиа. Предоставляемые услуги ориентированы на конечного пользователя, независимо от времени суток и места, где он расположен.

Спутниковые системы связи имеют определенное преимущество при обеспечении универсального широкополосного доступа в Интернет, а также при теле- и радиовещании в малонаселенных районах. Системы на основе низкоорбитальных и геостационарных спутников обеспечивают альтернативное средство подвижной связи для абонентов из любой точки Земли.

Предлагаемое учебное пособие знакомит с основами построения и функционирования таких сложных систем наукоемкой и динамично развивающейся области, как системы спутниковой связи, являющихся важным элементом мировой связи.

1 Принципы построения спутниковых систем связи

1.1. Основные понятия

Спутниковая связь является новым направлением науки и техники, появившимся в последние десятилетия. Она основывается на последних достижениях в области ракетной техники, космической технологии, информатики, цифровой техники связи. Многие из терминов в этой передовой области за это время сложились, другие еще окончательно не устоялись, а третьи только появляются и еще не вошли в обиход, поскольку имеют разные наименования в разных научных школах.

Ниже приводятся определения основных понятий в соответствии с «Регламентом радиосвязи», а также сложившейся к настоящему времени практикой применения терминов в спутниковых системах связи [1].

Космическая радиосвязь — радиосвязь, при которой используют космические станции, расположенные на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) или других космических объектах.

Космическая станция (КС) — станция, расположенная на объекте, который находится за пределами основной части атмосферы Земли (либо предназначен для вывода за ее границы), например на ИСЗ.

Земная станция (ЗС) — станция радиосвязи, расположенная на земной поверхности и предназначенная для связи с космическими либо с земными станциями через космические станции или космические объекты, например пассивные ИСЗ. В отличие от земных станций станции наземных систем радиосвязи, не относящихся к космическим системам связи или радиоастрономии, называются наземными.

Спутниковая связь (СС) — связь между земными станциями через космические станции или пассивные ИСЗ.

Таким образом, спутниковая связь — частный случай космической радиосвязи.



Рис. 1.1. Спутниковая линия связи

Спутниковая линия — линия связи между земными станциями с помощью одного ИСЗ на каждом направлении (рис. 1.1), включая участки «Земля — спутник» (линия вверх) и «спутник — Земля» (линия вниз).

Земные станции соединяются с узлами коммутации сетей связи (например, с междугородной телефонной станцией (МТС) или оптоволоконными и радиорелейными линиями связи), с источниками и потребителями программ телевидения, звукового вещания с помощью наземных соединительных линий (рис. 1.1). Земные станции могут устанавливаться непосредственно на МТС, телецентрах и поблизости от других источников и потребителей информации.

Спутниковое вещание — передача радиовещательных программ (телевизионных и звуковых) от передающих земных станций к приемным через космическую станцию — активный ретранслятор. Спутниковое вещание — частный случай спутниковой связи, отличающийся передачей определенного класса односторонних (симплексных) сообщений, принимаемых одновременно несколькими ЗС или же большим числом приемных станций при циркулярном виде передач.

В зависимости от типа земных станций и их назначения в системах связи различаются следующие службы радиосвязи:

фиксированная спутниковая служба (ФСС) — служба радиосвязи между земными станциями, локализованными в определенных, строго фиксированных пунктах с использованием одного или нескольких спутников. К фиксированной спутниковой службе относят также фидерные линии (линии подачи программ на космическую станцию) для других служб космической радиосвязи, например для радиовещательной спутниковой или спутниковой подвижной службы;

подвижная спутниковая служба (ПСС) — служба радиосвязи между подвижными земными станциями (или между подвижными и фиксированными ЗС) с участием одной или нескольких космических станций. В зависимости от места установки подвижной ЗС различают *сухопутную, морскую, воздушную* подвижные спутниковые службы;

радиовещательная спутниковая служба (РСС) — служба радиосвязи, в которой сигналы космических станций предназначены для непосредственного приема населением. При этом непосредственным приемом программ считается как индивидуальный, так и коллективный прием, причем в этом последнем случае программа может достав-

ляться индивидуальным абонентам с помощью наземной системы распределения — кабельной или эфирной. Сам же термин «радиовещание» объединяет как телевизионное, так и звуковое вещание. Определенная таким образом радиовещательная спутниковая служба включает в себя только те виды систем спутникового вещания, которые предназначены для приема на сравнительно простые и недорогие приемные установки с качеством, достаточным для абонента, но часто более низким, чем для магистральных линий подачи программ.

Системы, относящиеся к ФСС, могут использоваться также для распределения радиовещательных программ. Так, например, отечественные системы «Орбита» и «Москва», изначально предназначенные для распределения по территории страны телевизионных программ и программ звукового вещания через ИСЗ, относятся к ФСС. Принятые станцией «Орбита» программы высокого качества подают на телецентры, снабженные передатчиком большой мощности, а сама станция «Орбита» при этом является достаточно сложным строительным и техническим сооружением. Часто различие между фиксированной и вещательной службами в некоторых случаях стирается. Однако при их классификации учитывается то, что этим службам выделены различные полосы частот.

При передаче радиовещательных программ с помощью систем ФСС различают прямое и косвенное распределение программ. При прямом распределении программы подаются от системы ФСС непосредственно на наземные вещательные станции без каких-либо промежуточных распределительных систем, а при косвенном распределении программы поступают от земных станций ФСС для дальнейшего распределения по наземным сетям к различным наземным вещательным станциям.

Системы спутниковой связи (ССС) применяют для передачи различных видов информации, таких, как:

- программ телевидения, когда различают системы обмена между равноправными земными станциями, а также для циркулярного распределения программ от передающей станции к большому числу приемных;
- других видов симплексных сообщений, чаще всего циркулярного характера: изображений газетных полос, программ звукового вещания;
- телефонных сообщений, дуплексных по своему характеру; каналы тональной частоты и их группы можно использовать для обмена другими видами информации — телеграфной, дискретной от ЭВМ и других источников.

В зависимости от вида информации различают *универсальные многофункциональные спутниковые системы*, ЗС которых обмениваются различными видами информации (таковы Intelsat, «Орбита», ССС Канады Telesat и другие), и *специализированные* — для передачи одного вида или нескольких однородных видов информации (например, системы спутникового вещания «Экран», НТВ-Плюс для циркулярного распределения телевизионного и звукового вещания).

По охватываемой территории, размещению и принадлежности ЗС, а также структуре управления ССС можно отметить:

- *международные*, в состав которых входят станции различных стран; такие системы могут быть *глобальными*, со всемирным охватом пользователей, такие, как «Интерспутник», Intelsat, либо *региональными*, как Eutelsat, Arabsat, Asiasat;
- *национальные*, когда все ЗС расположены в пределах одной страны, в том числе *зоновые*, все ЗС которой расположены в пределах одной из зон (административной области, района) страны;
- *ведомственные* (деловые, фирменные) системы, ЗС которых принадлежат одному ведомству (одной организации, фирме) и передают только деловую или другую информацию в интересах этого ведомства.

В состав любой ССС, несмотря на функциональное и конструктивное различие, всегда входит несколько одинаковых по назначению элементов:

- *космические станции*, иногда называемые космическими аппаратами (КА), представляющие собой ретрансляционное приемопередающее устройство на борту ИСЗ с антеннами для приема и передачи радиосигналов и системами жизнеобеспечения: источниками энергоснабжения, системами ориентации антенн (на Землю), солнечными батареями, системами коррекции положения ИСЗ на орбите, терморегулирования и тому подобное;
- *земные станции* в составе комплекса технических средств для связи с КА различного типа. Перечислим основные из них [1]:

Приемные ЗС распределительных систем (систем спутникового вещания) — самый простой тип станций, работающих только в режиме приема телевизионных, радиовещательных и других циркулярных программ, например изображений газетных полос; обычно приемные ЗС для удешевления снабжают простой и недорогой антенной малого размера, а число таких ЗС в системе может быть достаточно велико.

Передающие ЗС системы спутникового вещания — станции, осуществляющие передачу на участке «Земля — ИСЗ» циркулярных

программ для последующего распределения по сети приемных станций. Если такая передающая ЗС находится в пределах обслуживаемой зоны и на ней возможен прием сигналов, излучаемых ИСЗ этой системы, то прием обычно используется для контроля качества вещания.

Приемопередающие ЗС, работающие в сети дуплексной телефонной связи (в том числе с возможностью передачи по телефонным каналам или группам каналов других видов сообщений — телеграфных, данных, программ звукового вещания и пр.), а также в сети обмена телевизионными программами.

Контрольные ЗС — станции для контроля режимов работы ретранслятора космической станции, соблюдения земными станциями сети важных для работы всей сети параметров — излучаемой мощности, частоты передачи, поляризации, качества модулирующего сигнала. Функции контрольной могут возлагаться на одну из передающих или приемопередающих станций сети.

Контрольные и центральные станции сети имеют возможность обмена информацией со станциями сети по специально создаваемой подсистеме *служебной связи*. Обычно эта подсистема работает через тот же ИСЗ, через который работает основная сеть.

Земные станции системы управления и контроля ИСЗ — станции, осуществляющие управление функционированием КС и подсистемами ИСЗ, а также контролирующие их состояние, режим вывода ИСЗ на орбиту при первоначальных испытаниях и вводе в эксплуатацию КС.

Соединительные наземные линии служат для соединения ЗС с источниками и потребителями передаваемой информации. Земная станция обычно удалена от них для уменьшения воздействия помех, обеспечения требований по углам закрытия антенн и др. Это соединительные линии от приемопередающей ЗС к междугородной телефонной станции (МТС) или какому-либо другому узлу коммутации телефонной сети, от приемной ЗС к телевизионному передатчику, типографии, радиовещательной станции.

Выносное оборудование — та часть оборудования спутниковой связи, которая может располагаться не на станциях спутниковой связи, а на других объектах. Так, на МТС могут устанавливаться необходимые для работы спутниковых каналов экзозаградители, аппаратура уплотнения, каналообразования и модуляции.

Центр управления системой связи — осуществляет руководство эксплуатацией системы и ее развитием, т. е. вводом в действие новых ЗС и ИСЗ, расписанием их работы, предоставлением ретрансляторов потребителям, проведением ремонтно-профилактических ра-

бот и т. п. Центр управления обычно соединяют со станциями сети каналами служебной связи.

1.2. Виды орбит. Основные определения. Состав и назначение систем спутниковой связи

Особенностью систем спутниковой связи является функционирование ретранслятора радиосигнала на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) с достаточно высокой орбитой обращения вокруг Земного шара и существующего достаточно длительное время без значительных затрат энергии на поддержание движения по этой орбите. При этом электрическое питание бортового ретранслятора и других служебных систем спутника осуществляется от энергии солнечных батарей, освещающих большую часть времени существования прямыми солнечными лучами и от аккумуляторов, заряжаемых от этих батарей.

На достаточно высокой орбите ИСЗ позволяет обслуживать видимую со спутника территорию площадью до одной трети всей поверхности Земли, поэтому через его бортовой ретранслятор могут непосредственно поддерживать между собой связь любые станции на этой территории. В этом случае всего три ИСЗ могут обеспечивать всемирную глобальную связь. Современные технические средства позволяют сформировать достаточно узкую диаграмму направленности бортовой антенны, чтобы можно было, при необходимости, обслуживать ограниченную площадь, занимаемую даже небольшим государством. Это создает возможность эффективно использовать частотный диапазон ИСЗ путем многократного применения одних и тех же частот для обслуживания небольших пространственно удаленных зон. Следует отметить, что трасса радиолуча между ИСЗ и земной станцией проходит обычно под углами наклона к земной поверхности, превышающими 5 угловых градусов, что уменьшает затухание в атмосфере и влияние теплового излучения Земли на качество приема сигналов.

Спутниковая связь начала свое развитие в середине 60-х годов XX века с появлением советского спутника «Молния» и американского «Телстар» и с этого времени бурно развивается. Правда, в последнее время для спутниковых систем связи появился достойный конкурент — оптоволоконные линии связи. Однако это не остановило дальнейшего развития и усовершенствование спутниковой связи. К настоящему времени создано и продолжает создаваться большое число систем спутниковой связи и вещания, различных по функциональным возможностям, обслуживаемой зоне, составу, информационной емкости, виду используемой орбиты.

Рассмотрим основные виды орбит в спутниковой связи [2].

Геостационарная орбита

Геостационарные спутники, или спутники на геостационарной орбите (ГСО) располагаются на высоте примерно 36000 км и находятся постоянно над определенной точкой земной поверхности. Этот эффект неподвижности достигается за счет того, что ИСЗ движется по орбите со скоростью вращения Земли и поэтому постоянно располагается над одной и той же точкой ее поверхности, расположенной на экваторе. Связь через такой спутник не имеет перерывов во времени из-за взаимного перемещения спутника и терминала пользователя, как это имеет место при других видах орбиты. Система из трех спутников на геостационарной орбите может обеспечить связь с терминалами пользователя практически на всей территории видимой со спутников земной поверхности.

Основными достоинствами систем связи с ИСЗ на геостационарной орбите являются возможность непрерывной связи во всей глобальной зоне обслуживания и практическое отсутствие на линии связи доплеровского сдвига частоты.

Орбитальный ресурс геостационарных ИСЗ в настоящее время достаточно высок, активный срок их существования составляет около 15 лет и теоретически может быть еще увеличен.

Спутники на геостационарных орбитах широко используются для систем радио- и телевизионного вещания, поскольку для них задержки сигнала в 270 мс при распространении существенно не сказываются на качестве приема сигналов. Суммарная задержка в системах этого класса с учетом времени обработки и коммутации сигналов в наземных сетях может достигать 350...400 мс, что затрудняет процесс общения абонентов по телефону даже при современной продвинутой технике подавления эха. При двойном скачке на спутниковой трассе с ретрансляцией через наземную станцию-шлюз задержка становится недопустимой. Кроме того, геостационарные ИСЗ не обеспечивают высококачественную связь в высокоширотных районах земного шара и поэтому не гарантируют, в идеальном смысле, глобальное обслуживание.

Однако достоинства систем связи на базе геостационарных спутников существенно перевешивают эти недостатки, поэтому большинство современных систем спутниковой связи используют именно такие орбиты.

Средневысотные орбиты

Системы спутниковой связи со средневысотными ИСЗ, по сравнению с геостационарными, находятся на меньшем расстоянии от Земли.

Они могут также обеспечить непрерывное во времени высококачественное обслуживание абонентов за счет расширения сектора наведения антенн земных станций и увеличения числа ИСЗ, находящихся одновременно в поле зрения наземного абонента. Благодаря уменьшению расстояния до ИСЗ может быть снижен энергетический ресурс радиолинии, необходимый для компенсации потерь на распространение.

Одним из ограничителей применения негеостационарной орбитальной группировки является наличие радиационных поясов Ван Алена из заряженных частиц, захваченных магнитным полем Земли. Первый такой пояс радиации высокой интенсивности (10000 имп./с) простирается на высоте 2000...9000 км в полосе до 30° широты в обе стороны от экватора, второй пояс радиации такой же интенсивности расположен на высотах 13000...19000 км, примерно до 50° широты в обе стороны от экватора [2].

Средневысотные спутники МЕО (Medium Earth Orbit) занимают место на орбите между первым и вторым поясами Ван Алена в диапазоне высот от 5000 до 15000 км. Они создают на земной поверхности существенно меньшую по площади зону обслуживания по сравнению с геостационарными. Для глобального охвата с однократным покрытием наиболее населенных районов Земного шара и судоходных акваторий необходимо иметь на орбите от 7 до 12 средневысотных спутников.

Полная задержка времени распространения сигналов при связи через средневысотные спутники составляет не более 130 мс, и это позволяет использовать их для персональной радиотелефонной связи.

Средневысотные спутники предпочтительнее систем с более высокими орбитами и по энергетическим параметрам, но существенно уступают им по продолжительности пребывания КА в зоне видимости ЗС (1,5...2 ч).

Орбитальный ресурс ИСЗ этого типа лишь незначительно меньше геостационарных КА, а период обращения вокруг Земли составляет около 6 ч, из которых лишь несколько минут спутник находится в области тени Земли. Это облегчает работу бортовой системы электропитания и позволяет обеспечить срок службы от 12 до 15 лет.

Низкие круговые орбиты

В зависимости от наклона плоскости орбиты i спутника-ретранслятора относительно плоскости экватора различают низкие экваториальные ($i = 0$), полярные ($i = 90^\circ$) и наклонные орбиты.

Системы с использованием спутников на низких наклонных и полярных орбитах применяются в течение более чем 30 лет для научно-исследовательских целей, дистанционного зондирования, навигации,

метеорологических наблюдений, фотографирования поверхности Земли и для других специальных целей. В последние годы началось интенсивное освоение этого вида орбит высотой от 700 до 1500 км, а также орбит экваториальных, высотой 2000 км, для мобильной и персональной видов связи.

Низкие орбиты выигрывают по сравнению с другими видами орбит в энергетических параметрах, но проигрывают в продолжительности сеансов связи и времени активного существования ИСЗ. Так, при периоде обращения аппарата 100 мин в среднем 30 % времени он находится на теневой стороне Земли, а его аккумуляторные батареи работают в режиме 5000 циклов зарядки/разрядки в год, что значительно сокращает срок их службы.

Выбор орбит в диапазоне высот 500...2000 км для низкоорбитальных систем не случаен, так как при высоте менее 500 км плотность атмосферы относительно высока и имеется повышенное сопротивление воздуха, вызывающее деградацию орбиты с постепенным снижением высоты апогея. Уменьшение высоты орбиты приводит также к необходимости увеличения частоты маневров по увеличению высоты для сохранения параметров орбиты и к повышенному расходу топлива.

Длительная работа электронной бортовой аппаратуры на орбитах выше 1500 км из-за наличия радиационного пояса Ван Алена практически невозможна без специальных методов защиты, что ведет к существенному усложнению аппаратуры и увеличению ее массы.

Со снижением высоты орбиты все более уменьшается площадь зоны обслуживания и требуется большее количество спутников для глобального обслуживания территории. Для низкоорбитальной системы глобальной связи с непрерывным обслуживанием территории количество ИСЗ в орбитальной группировке должно быть не менее 48. Период обращения спутников на таких орбитах составляет от 90 мин до 2 ч с максимальным временем пребывания в зоне видимости не более 10...15 мин.

Эллиптические орбиты

Параметрами эллиптической орбиты являются период обращения ИСЗ вокруг Земли и эксцентриситет эллипса орбиты. В настоящее время на практике применяются несколько основных типов эллиптических орбит с большим эксцентриситетом.

За счет значительной высоты апогея спутник на эллиптической орбите большую часть времени находится в зоне видимости определенного региона и обеспечивает непрерывную связь в течение довольно длительного времени. Так, спутник на орбите типа «Молния» с

апогеем 40000 км и перигеем 460 км может обеспечить сеансы связи длительностью 8...10 час.

Эти параметры объясняются медленным движением спутника в области апогея и определяют систему связи с как бы геостационарной (квазигеостационарной) орбитой при использовании одного спутника из общего семейства в течение 3,5 ч.

Низкий апогей орбиты типа «Молния» приводит к повторяющимся пересечениям спутником пояса повышенной радиации и, соответственно, к сокращению срока его службы. По этой причине может быть выбрана высокоэллиптическая орбита (ВЭО) с более высоким перигеем (примерно 20 тыс. км), апогеем (примерно 50 тыс. км) и периодом обращения 24 ч.

Достоинства и определенные преимущества ВЭО:

- обширная зона видимости северного полушария, в котором проживает большая часть человечества, а также его приполярных областей;
- возможность размещения на ВЭО нескольких десятков независимых сетей связи с одинаковыми параметрами и смещенной высотой апогея;
- обеспечение для земных станций в высоких широтах более высоких углов подъема антенн над горизонтом для уменьшения внешних шумов окружающей среды и экранирования соседними зданиями при неровном рельефе местности;
- меньшие затраты энергии при выводе спутника на орбиту и поддержании ее параметров по сравнению с геостационарным спутником.

В то же время ВЭО имеет и существенные недостатки по сравнению со стационарной орбитой, поскольку антенны земных станций должны постоянно отслеживать движение спутника по орбите, а число сменяющихся спутников в составе одной сети связи должно быть достаточно большим либо на земных станциях должна применяться слабонаправленная неподвижная антенна.

При остронаправленной земной антенне во время связи необходимо осуществлять наведение главного лепестка диаграммы направленности с одного спутника на другой, а в случае сети с слабонаправленными антеннами земных станций это необходимо выполнять только для антенны центральной станции.

В течение сеанса связи изменяется расстояние от спутника до поверхности Земли, площадь зоны покрытия и уровень сигнала, а также требуется коррекция точки прицеливания антенны спутника в процессе сеанса связи.

По сравнению с низкими орбитами достоинствами ВЭО являются ее синхронность, гораздо более длинный сеанс связи через один спутник, меньшее число спутников в одной системе, увеличение зоны обслуживания, недостатком — большее время распространения и задержки сигнала.

Сравнительные характеристики спутниковых систем с орбитами различного типа

К основным характеристикам спутниковых систем с орбитами различного типа, относятся:

- число ИСЗ в орбитальной группировке;
- число орбитальных плоскостей, занимаемых группировкой;
- число ИСЗ в орбитальной плоскости;
- время пребывания ИСЗ в зоне видимости земной станции спутниковой связи;
- угол наклона антенны земной станции на краю зоны обслуживания.

Чем выше орбита ИСЗ, тем меньшее число спутников требуется для глобального покрытия одной и той же по площади обслуживаемой территории земной поверхности. Для круговых орбит взаимосвязь между числом ИСЗ, высотой их орбиты и углом места над горизонтом определяется выражением

$$N = pq = \frac{4\sqrt{3}}{9} \left(\frac{\pi}{\gamma} \right)^2,$$

где $p = \frac{2}{3} \frac{\pi}{\gamma}$ — число орбитальных плоскостей; $q = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\pi}{\gamma} \frac{\cos \Theta}{1 + h/R_3}$ — число космических аппаратов в одной плоскости; $\gamma = \arccos \frac{\cos \Theta}{1 + h/R_3}$ — Θ — угол, который отсчитывается от центра Земли между направлениями на ИСЗ и границу зоны обслуживания; Θ — угол места ЗС на границе зоны обслуживания; h — высота орбиты; R_3 — радиус Земли.

Сравнительные характеристики спутниковых систем связи с различными типами орбит (ГЕО, МЕО, ЛЕО) приведены в табл. 1.1. В этой же таблице приведены также краткие характеристики систем спутниковой связи с высокими эллиптическими орбитами. Как следует из таблицы, наименьшее число ИСЗ в системе связи с глобальным обслуживанием достигается при использовании геостационарной орбиты, хотя по другим показателям (задержке сигнала, углу места, энергетике) предпочтение можно было бы отдать и другим орбитам.

Таблица 1.1

Тип орбиты	ГЕО	МЕО	ЛЕО	ВЭО
Высота орбиты, км	36000	10355	700...5000	40000
Количество КА в орбитальной группировке при непрерывном глобальном охвате	3	8–12	48–66	6–8
Время пребывания КА в зоне видимости	непрерывное	1,5...2 ч	1...15 мин	8...9 ч
Угол места на краю зоны обслуживания, град	5	25...30	10...15	25...40

1.3. Общие вопросы структурно-функционального построения систем спутниковой связи и ее составных частей

1.3.1. Состав системы

В соответствии с принятой практикой оборудование спутниковых систем связи разделяют на два интегрированных комплекса [3]:

- космический сегмент, образуемый космической станцией или космическим аппаратом, функционирующим на орбите, и центром управления полетом, обеспечивающим функционирование КА в течение срока его эксплуатации;
- земной сегмент в составе земных станций спутниковой связи с необходимыми техническими средствами контроля, управления, служебной связи и сопряжения с наземной сетью.

Технические характеристики космического сегмента, предоставляемого оператором (владельцем) спутника для работы в составе системы, должны поддерживаться этим оператором с необходимым уровнем сервиса.

В составе земного сегмента, кроме технических средств организации спутниковых каналов как основы земного сегмента, находятся также средства контроля, управления, служебной связи и сопряжения с наземной сетью, представляющие собой отдельные подсистемы.

1.3.2. Требования к космическому сегменту

Космический сегмент системы ФСС предназначен для обеспечения ретрансляции через радиотехнический бортовой комплекс цифровых потоков земных станций в течение всего срока эксплуатации (аренды) ретрансляторов с заданным уровнем качества и сервиса.

В течение этого срока технические характеристики сегмента должны соответствовать его тактико-техническим требованиям или спецификациям в части:

- допустимых ошибок прицеливания антенн с учетом их деформаций, вызванных тепловыми эффектами и точностью удержания КА на орбите;
 - обеспечения работы с основным и резервным комплектами оборудования КА;
 - функционирования при полной загрузке всех стволов ретранслятора;
 - всех допустимых конфигураций ретрансляционной аппаратуры (модуля полезной нагрузки) и типов ретранслируемых сигналов.
- Предполагаемые к использованию в составе космического сегмента системы, должны удовлетворять ряду требований:

- координироваться со всеми Администрациями связи, которые могут испытывать помехи от них;
- нотифицироваться в Международном союзе электросвязи;
- работать в режимах, согласованных в процессе координации.

Оператор космического сегмента должен обеспечивать:

- постоянный и эпизодический телеметрический контроль технических параметров всех узлов платформы и модуля полезной нагрузки, а также модуля служебных систем КА с последующим фиксированием технических показателей;
- резервирование основных узлов в нештатных ситуациях КА по командам с Земли или в автоматическом режиме;
- поддержание КА в точке стояния на ГСО с проведением траекторных измерений фактического положения и последующей выдачей команд в режимах ручного или автоматического управления;
- проведение необходимых регламентных работ на КА для обеспечения его работоспособности в течение всего назначенного срока эксплуатации.

1.3.3. Требования к земному сегменту

Земной сегмент системы спутниковой связи обеспечивает:

- организацию спутниковых каналов путем формирования требуемых цифровых потоков из сигналов различного вида, перенос их спектров в диапазон частот передачи, прием и демодуляцию радиосигналов для последующего формирования исходящих сигналов;
- сопряжение входящих и исходящих цифровых потоков и аналоговых сигналов с цепями связи государственной сети общего пользования, а также сетями других ведомств;
- управление работой радиотехнического и телекоммуникационного оборудования сети связи по заданным алгоритмам;

- постоянный технический контроль работоспособности оборудования всего земного сегмента.

Требования к техническим характеристикам радиотехнического оборудования земного сегмента формируются на основе известных технических характеристик арендуемых стволов (транспондеров) ИСЗ, выбора методов модуляции и видов многостанционного доступа к спутниковому ретранслятору, а также на основе установленных параметров качества передаваемой информации.

1.4. Основные параметры систем спутниковой связи

1.4.1. Параметры земных станций

Рассмотрим важнейшие параметры земных станций спутниковой связи.

Диапазоны частот приема и передачи, на которые рассчитано оборудование станции, — антенна, приемная и передающая аппаратура. Большинство ЗС ФСС работает в диапазонах 1,5; 4; 11 и 20 ГГц на прием и 1,6; 6; 14 и 30 ГГц на передачу.

Добротность станции на прием G/T , или шумовая добротность (ШД) приемной системы — отношение коэффициента усиления антенны с учетом затухания в фидере (в децибелах на частоте приема) к суммарной шумовой температуре станции (в децибелах относительно 1 К) [1]. В настоящее время эта шумовая добротность достигает 42 дБ/К для самых больших применяемых на практике в ЗС спутниковых систем связи антенн (диаметром 32 м) и составляет 20...31,7 дБ/К для ЗС большинства национальных и региональных систем.

Эквивалентная изотропная излучаемая мощность (ЭИИМ) определяется как произведение мощности передатчика на коэффициент усиления антенны (в полосе передачи) относительно изотропной антенны. Этот параметр обычно находится в пределах 50...95 дБВт. Для упрощенного расчета помех, создаваемых другим сетям связи, часто указывают максимальную спектральную плотность излучаемой ЗС ЭИИМ (Вт/Гц), несмотря на то что точный расчет перекрестных помех требует знания тонкой структуры применяемых в системе видов сигналов.

Диаметр антенны оказывает решающее влияние на размеры и стоимость ЗС; именно он и определяет добротность и ЭИИМ станции, а также ее пространственную избирательность; если в системе используется разделение сигналов по поляризации, необходимо также знать кроссполяризационные характеристики антенны и указывать, с

каким видом поляризации работает станция. В составе ЗС магистральной связи обычно применяют антенны диаметром от 1,5...2,5 до 12 м, иногда до 32 м. Для ЗС сетей корпоративной связи — от 0,45 до 2,5...4 м.

Антенна характеризуется также параметрами опорно-поворотного устройства и всей системы наведения антенны на ИСЗ. Различают антенны *полноповоротные*, способные направляться в любую точку небосвода и *неполноповоротные*, имеющие ограниченную область оперативного наведения на источник сигнала. Системы наведения антенн характеризуются также возможной скоростью и ускорением углового перемещения. В последние годы все чаще применяют неполноповоротные, медленно движущиеся и неподвижные антенны, пригодные для работы только с геостационарными ИСЗ.

1.4.2. Основные показатели космических станций

Космические станции характеризуются теми же показателями, что и ЗС: рабочим диапазоном частот, добротностью, ЭИИМ каждого передатчика, поляризацией излучаемых и принимаемых сигналов. Однако значения ряда параметров существенно отличаются от одноименных параметров ЗС. Так, например, шумовая добротность приемного тракта обычно составляет $-10...+6$ дБ/К, что вызвано не только меньшими размерами бортовой антенны, но и применением упрощенного входного малошумящего усилителя. Оборудование ИСЗ имеет ЭИИМ, как правило, в пределах 23...45 дБВт, с повышением до 52...58 дБВт на спутниках непосредственного телевизионного вещания.

Важнейшей характеристикой ретранслятора космической станции является число стволов (ретрансляторов), размещаемых на борту.

Стволом ретранслятора или ЗС, или стволом спутниковой связи называется приемопередающий тракт, в котором радиосигналы проходят через общие усилительные элементы в выделенной этому стволу общей полосе частот. Весь диапазон частот, в котором работает спутник связи, принято делить на некоторые полосы шириной 27...36, 72...120 МГц, в которых усиление сигналов осуществляется отдельным трактом — стволом. Несколько стволов могут иметь общие элементы — антенну, волноводный тракт, малошумящий входной усилитель. Полоса одного ствола может разделяться фильтрами для выделения и последующей демодуляции сигналов от различных земных станций, проходящих через общий ствол ИСЗ (при частотном многостанционном доступе).

Вместо термина «ствол» иногда может применяться термин, заимствованный из английского языка, — «транспондер».

Число транспондеров, одновременно действующих на ИСЗ, может составлять 6–12, достигая 27–48 на наиболее мощных ИСЗ. Сигналы от отдельных транспондеров разделяются по частоте, пространству, поляризации. Числом транспондеров, их полосой пропускания и ЭИИМ определяется в основном важнейший суммарный показатель ИСЗ — *пропускная способность* — число телефонных и телевизионных каналов либо в более общем виде: число двоичных единиц в секунду, которое можно передать через данный ИСЗ. О пропускной способности ИСЗ можно говорить лишь условно, поскольку она зависит от добротности применяемых в системе земных станций и вида применяемых радиосигналов. Пропускная способность, по существу, — характеристика всей системы связи, а не самого ИСЗ. Тем не менее в литературе часто используется понятие пропускной способности (емкости) ИСЗ.

В зависимости от диаграммы направленности бортовых антенн ИСЗ характеризуется *зоной покрытия* — той частью площади земной поверхности, в пределах которой обеспечивается необходимый уровень сигналов от ИСЗ для приема с заданным качеством при определенной добротности ЗС. Зона покрытия ИСЗ характеризует всю систему спутниковой связи, а не только собственно ИСЗ.

Зона покрытия определяется шириной диаграммы направленности бортовой антенны ИСЗ и рассчитывается как контур, ограниченный пересечением поверхности Земли конусом диаграммы направленности бортовой антенны по заданному уровню, обычно по уровню половинной мощности или -3 дБ. Форма этого контура зависит от координат подспутниковой точки в виде проекции точки размещения ИСЗ на земную поверхность через ее центр, «точки прицеливания» — места пересечения максимума диаграммы бортовой антенны с земной поверхностью, а также от нестабильности положения ИСЗ на орбите и неточности ориентации его антенн. В связи с возможной нестабильностью положения спутника на орбите вводится понятие *гарантированной зоны обслуживания*, в которой обеспечивается сохранение указанных ранее условий приема и передачи при любых сочетаниях отклонений ИСЗ и антенны ИСЗ от среднего положения.

Точка стояния ИСЗ на орбите, точка прицеливания его антенны, нестабильности этих параметров существенны для расчета зон обслуживания и взаимных помех между ССС. Для учета взаимных помех должна быть известна максимальная *спектральная плотность излучаемого ИСЗ потока мощности* ($\text{Вт}/\text{м}^2\text{Гц}$).

Важнейшим параметром ИСЗ, определяющим как надежность, так и экономические характеристики всей системы связи, является

срок службы ИСЗ, определяющий время наработки до отказа допустимого числа транспондеров космической станции, определяемое с вероятностью 0,9 и более. В современных ИСЗ благодаря высокой надежности комплектующих изделий и правильной схеме резервирования срок службы достигает 10...12 лет и более.

1.4.3. Основные показатели систем спутниковой связи

Зона обслуживания — часть земной поверхности, внутри которой необходимо обеспечить нормальную работу земных станций. На этой территории необходимо обеспечить не только выполнение всех требований к зоне покрытия, но и защиту от помех со стороны других радиосистем, в том числе других спутниковых систем связи.

Зона обслуживания системы — это объединенная зона обслуживания отдельных ИСЗ данной системы связи.

Термин «объединенная» означает, что зоны отдельных ИСЗ могут перекрываться.

Пропускная способность системы — это объединение пропускных способностей всех входящих в систему ИСЗ. Пропускная способность системы связи, как и зона обслуживания, может оказаться меньше суммы пропускных способностей отдельных ИСЗ. Дело в том, что для связи между земными станциями, обслуживаемыми разными ИСЗ, часть каналов может транслироваться разными КА последовательно — с помощью двух скачков на линии (Земля — ИСЗ — Земля — ИСЗ — Земля) или через межспутниковые линии связи (Земля — ИСЗ — ИСЗ — Земля).

Пропускная способность системы зависит от числа спутников на орбите и от воздействия помех, создаваемых другими ССС. Система спутниковой связи характеризуется и другими параметрами: количеством и местом дислокации ЗС, числом ИСЗ, типом их орбиты и подспутниковой точкой. Определенной характеристикой спутниковой системы являются также число транспондеров на борту ИСЗ, их полоса пропускания, ширина и номиналы полос частот транспондеров на участках Земля — ИСЗ и ИСЗ — Земля.

Важнейшей характеристикой спутниковой системы связи является *метод многостанционного доступа* — метод совмещения сигналов различных ЗС для их прохождения через общий транспондер бортового ретранслятора. Многостанционный доступ (МД) позволяет иметь на борту ИСЗ количество транспондеров меньше числа ЗС в системе. Для сокращения их количества применяется МД с разделением сигналов по частоте, форме и времени. Всякий такой способ МД приводит к потере пропускной способности стволов на 3...6 дБ, однако

в наиболее совершенных системах с временным разделением (МДВР) эти потери не превышают 0,5...2 дБ [1].

На характеристики системы связи, такие, как ширина полосы частот, электромагнитная совместимость с другими системами связи, существенно влияет применяемый *метод модуляции*. Наиболее распространенными являются частотная модуляция (ЧМ) при передаче сообщений в аналоговой форме и фазовая модуляция (ФМ) при передаче сообщений в дискретной форме. Важнейшее значение при ЧМ имеет параметр девиации частоты, при ФМ — число фаз несущей (кратность модуляции), а при передаче программ телевидения — способ передачи звукового сопровождения (временное или частотное совмещение с видеосигналом, частота поднесущей частоты звукового канала и т. п.).

Важной характеристикой системы спутниковой связи является качество организуемых в ней каналов — телевизионных, телефонных и др. Обычно ССС используется для организации передачи международных либо междугородных каналов связи большой протяженности, причем качество каналов должно соответствовать требованиям рекомендаций Международного союза электросвязи (МСЭ) и государственных нормативных документов. В некоторых системах спутниковой связи, исходя из их назначения или экономических соображений, могут допускаться как более высокие, так и более низкие показатели качества.

1.5. Состав земных и космических станций

Простейшим типом земной станции для приема однонаправленной информации является одноствольная приемная ЗС. Сигналы, передаваемые бортовой антенной ИСЗ, принимаются антенной 1 ЗС в виде электромагнитного поля СВЧ и преобразуются в электрическое напряжение (ток) СВЧ (рис. 1.2, а). Принятый сигнал усиливается входным устройством 2, содержащим малошумящий усилитель (МШУ), смеситель, предварительный усилитель промежуточной частоты.

Необходимые для преобразования частоты колебания формируются гетеродином 3. Основное усиление сигнала осуществляется в усилителях промежуточной частоты УПЧ 4, в состав которых входят фильтры, формирующие полосу пропускания усилителей, оптимальную для приема. Вслед за усилителем включается также демодулятор 5, выделяющий передаваемое сообщение, и оконечное каналообразующее оборудование 6.

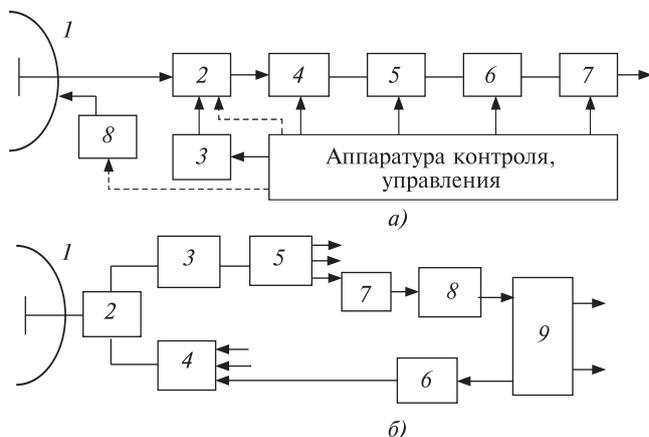


Рис. 1.2. Упрощенные структурные схемы ЗС и КС

Принятая земной станцией информация поступает по наземной соединительной линии 7 к потребителю программ или на телевизор клиента, если это станция индивидуального приема. В современных высококачественных приемных устройствах часто применяют двукратное преобразование частоты.

Комплекс 8 содержит систему управления и опорно-поворотное устройство антенны, которые служат для наведения максимума диаграммы направленности антенны на ИСЗ. В него входят собственно механическая опора, электромеханический привод с редуктором, перемещающий антенну, и аппаратура наведения, управляющая его движением. В простых приемных станциях антенна небольшого диаметра с довольно широкой диаграммой направленности закрепляется на опоре неподвижно и снабжена механизмом первоначальной ориентации или оснащена позиционером для установки в несколько фиксированных рабочих положений.

Сложные земные станции дуплексной связи, работающие одновременно в нескольких транспондерах ИСЗ, строятся по более общей схеме (рис. 1.2, б). Здесь 1 — антенна с устройством наведения; 2 — фильтр разделения частот приема и передачи; 3 — МШУ; 4 — устройство сложения (фильтр сложения) сигналов, принимаемых от различных транспондеров; 5 — устройство разделения (фильтр разделения) принимаемых сигналов различных транспондеров; 6 — передающее устройство; 7 — приемное устройство; 8 — каналобразующая аппаратура; 9 — аппаратура соединительной линии. На схеме могут быть показаны также резервные комплекты с переключателями, обычно имеющиеся на ЗС для повышения надежности.

Основными и важными элементами радиотехнического комплекса космической станции, входящего в систему спутниковой связи, являются антенны и бортовые ретрансляторы.

1.6. Диапазоны частот, выделенные для спутниковой связи и вещания, и регулирование их использования

Быстрое развитие разнообразных систем спутниковой связи — вещания, телевидения, подвижной связи и других — поставило ряд проблем как международно-правового, так и технического характера. При этом известно, что рассмотрением основополагающих вопросов правового характера занимается Организация Объединенных Наций (ООН). Необходимые же технические правила и процедуры, регулирующие использование диапазона частот и распределение позиций на геостационарной орбите (ГО), вырабатываются специализированным учреждением ООН — Международным союзом электросвязи (МСЭ).

Еще в 1961 г. Генеральная ассамблея ООН сформулировала положение о том, что «как только это будет практически осуществимо, связь с помощью спутников должна стать доступной всем государствам на всемирной основе, исключаящей дискриминацию».

В 1968 г. в Вене состоялась 1-я Конференция ООН, на которой обсуждались вопросы освоения космического пространства и затрагивались вопросы использования геоцентрической орбиты для спутниковой связи. Вторая такая конференция ООН в 1982 г. подтвердила необходимость продолжения сотрудничества всех стран в этой области.

ООН приняла активное участие в международном регулировании организации спутниковой связи и использования ГО поскольку всякая космическая деятельность должна соответствовать требованиям международного права и Устава ООН. Это было отражено в «Договоре о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела», принятом в 1967 г.

Основополагающий документ МСЭ — Устав, принятый Полномочной конференцией МСЭ в Женеве в 1992 г., содержит Статью 44 «Рациональное использование спектра радиочастот и орбиты геостационарных спутников». Ее пункт 196 содержит положение о том, что «при использовании полос частот для радиосвязи Члены Союза должны учитывать то, что радиочастоты и орбита геостационарных спутников являются ограниченными естественными ресурсами, которые

надлежит использовать рационально, эффективно и экономно, в соответствии с положениями Регламента радиосвязи, чтобы обеспечить справедливый доступ к этой орбите и к этим частотам разным странам или группам стран с учетом особых потребностей развивающихся стран и географического положения некоторых стран».

Вопросы о рациональном использовании частот космическими службами радиосвязи рассматривался в МСЭ вскоре после запуска в СССР первого в мире искусственного спутника Земли на Административной конференции радиосвязи 1959 г. Правда, тогда каких-либо процедур заявления или регистрации частот для спутниковых служб эта конференция не устанавливала.

Однако уже в 1963 г. Чрезвычайная конференция радиосвязи распределила полосы частот для космической радиосвязи и разработала процедуры их использования, предусматривающие координацию частот земных станций с другими наземными радиосредствами и их регистрацию в Международном комитете регистрации частот (МКРЧ) Международного союза электросвязи. На ВАКР-71 была изменена таблица распределения полос частот с расширением этого перечня для спутниковых служб. Были также впервые выделены полосы частот для спутниковой вещательной службы с учетом их использования с учетом международных планов и при отсутствии облучения территории других стран без их предварительного согласия, за исключением технически невыполнимых случаев. Были разработаны и введены в Регламент радиосвязи процедуры предварительной публикации и координации частотных присвоений спутниковых сетей с использованием геостационарной орбиты [4].

На ВАКР-77 был впервые разработан план вещательной спутниковой службы диапазона 11,7...12,5 ГГц в Районе 1 и 11,7...12,2 ГГц в Районе 3. Здесь же были выработаны правила совместного использования частот службами радиосвязи всех трех Районов и принципы планирования радиовещательной спутниковой службы Района 2.

К Району 1 отнесены Европа, Африка, территория бывшего СССР и МНР, к Району 2 — Северная и Южная Америка, Району 3 — Азия, Океания и Австралия.

На Всемирной административной конференции радиосвязи в 1979 г. был пересмотрен Регламент радиосвязи по использованию полос частот и геостационарной орбиты. Была пересмотрена таблица распределения частот, уточнены процедуры координации и регистрации, подтвержден принцип равного права доступа всех стран к использованию геостационарной орбиты и полосам частот, предназначенных для служб космической радиосвязи.

В 1983 г. на РАКР Района 2 был разработан план частотных присвоений и выделений орбитальных позиций для спутниковой вещательной службы Района 2 в диапазоне 12,2...12,7 ГГц (линия Космос — Земля) и план линий подачи программ в полосе 17,3...17,8 ГГц.

В 1985 г. состоялась первая, а в 1988 г. вторая сессии Всемирной административной конференции радиосвязи (ВАКР ОРБ 1). На конференции рассмотрены возможности усовершенствования процедур использования геостационарной орбиты и полос частот, распределенных для спутниковой службы. Это обеспечило гарантированный и равноправный доступ всех стран к геостационарной орбите и позволило выработать план для фиксированной спутниковой службы и фидерных линий спутниковой вещательной службы в Районах 1 и 3.

Согласно реформам, проведенным Дополнительной полномочной конференцией МСЭ, создан Сектор радиосвязи МСЭ, под эгидой которого проходят регулярные (раз в два года) Всемирные конференции радиосвязи и Ассамблеи радиосвязи, заменившие ВАКР и Пленарные ассамблеи.

Согласно действующему Регламенту радиосвязи любое частотное присвоение для земной или космической станции подлежит регистрации в МСЭ, «если использование данной частоты может причинить вредные помехи какой-либо службе другой администрации, или частота должна быть использована для международной связи, или если желательное формальное международное признание использования этой частоты». Таким образом, практически все спутниковые системы должны быть зарегистрированы, а в процессе регистрации должна быть проведена проверка совместимости заявляемых систем с уже действующими или заявленными ранее. При этом используются два подхода для удовлетворения потребностей стран в спутниковых системах при одновременном обеспечении их ЭМС, это:

1) постепенное повышение загрузки полос частот и уплотнение позиций на геостационарной орбите, основанные на международной координации, и

2) разработка международных перспективных планов априори для использования отдельных полос частот какой-либо спутниковой службой.

Несмотря на то что в рамках МСЭ уже имеется опыт одновременного применения двух этих подходов, международное регулирование положений для конкретной спутниковой службы в заданном диапазоне частот все еще является сложной политической, правовой, технической и экономической задачей.

1.6.1. Распределение полос частот между службами

Распределение полос частот между различными службами радиосвязи является сложной процедурой и проводится МСЭ на конференциях радиосвязи на базе научных исследований стран-членов МСЭ, представляемых в исследовательские комиссии сектора радиосвязи.

Основным документом, регламентирующим использование частот, является Регламент радиосвязи с Таблицей распределения полос частот между службами и техническими ограничениями, необходимыми при совместном использовании частот различными службами, а также процедурами координации систем и правилами регистрации частотных присвоений в Бюро радиосвязи МСЭ.

Названная Таблица распределения частот Регламента радиосвязи содержит полосы частот для использования службами радиосвязи в пределах 9 кГц...275 ГГц. Таблица состоит из трех столбцов, каждый из которых соответствует одному из трех Районов. В таблице оговорены полосы частот, выделенные для служб космической радиосвязи. Ниже приводятся полосы частот, распределенные согласно Регламенту радиосвязи, между различными спутниковыми службами.

Для службы межспутниковой радиосвязи, обеспечивающей связь между ИСЗ связи, выделены полосы частот, ГГц: 22,55...23,55; 32...33; 54,25...58,2; 59...64; 116...134; 170...182; 185...190.

1.6.2. Международная координация использования частот спутниковыми системами

В настоящее время существующие спутниковые системы различных администраций, использующие геостационарные ИСЗ, согласованы между собой в части распределения частот в соответствии со Статьей 11 Регламента радиосвязи (табл. 1.2–1.4).

В процессе координации администрации должны более точно оценить уровни возможных помех и принять обоюдные шаги к решению проблемы. При необходимости могут быть рассмотрены возможные изменения позиций ИСЗ, согласование параметров передаваемых сигналов, параметров антенн, мощностей передатчиков и т. д.

Техническая процедура координации, заключающаяся в более точной оценке возможных помех и выработке необходимых условий, в настоящее время Регламентом радиосвязи не оговорена. На практике координация систем основывается на материалах МККР по нормам и методике расчета уровня помех или на других взаимосогласованных критериях.

Принятая в 1971 г. Резолюция 2 относительно использования всеми странами на равных правах полос частот для служб космической

Таблица 1.2

Полосы частот фиксированной спутниковой службы, ГГц

Космос — Земля	Земля — Космос
2,5...2,69 (Район 2); 2,5...2,535 (Район 3)	2,655...2,690 (Районы 2 и 3)
3,4...4,2; 4,5...4,8; 7,25...7,75	5,725...7,075 (Район 1); 5,85...7,075 (Районы 2 и 3); 7,9...8,4
—	10,7...11,7 (Район 1 только для фидерных линий к радиовещательным спутникам, работающим в полосе около 12 ГГц)
10,7...11,7; 11,7...12,2 (Район 2); 12,2...12,5 (Район 3); 12,5...12,75 (Районы 1 и 3)	12,5...12,75 (Район 1); 12,7...12,75 (Район 2); 12,75...13,25; 13,75...14,5
—	14,5...14,8 (только для фидерных линий к радиовещательным спутникам, работающим в полосе около 12 ГГц для стран Европы)
—	17,3...18,1 (только для фидерных линий к радиовещательным спутникам, работающим в полосе около 12 ГГц)
17,7...21,2; 37,5...40,5	24,75...25,25 (Районы 2 и 3); 27...27,5 (Районы 2 и 3); 27,5...31; 42,5...43,5; 49,2...50,2
—	47,2...49,2 (только для фидерных линий к радиовещательным спутникам, работающим в полосе 40,5...42,5 ГГц)
81...84; 102...105; 149...164; 231...241	50,4...51,4; 71,0...75,5; 92...95; 202...217; 265...275
Если Район не указан, это значит, что полоса выделена для фиксированной спутниковой службы на всемирной основе. Все полосы частот распределены фиксированной спутниковой службе на совмещенной основе с другими службами; полос, распределенных на исключительной основе, нет.	

Таблица 1.3

Полосы частот радиовещательной спутниковой службы, ГГц

Частота	Район	Примечание
0,62...0,79	1, 2, 3	Могут быть использованы для систем спутникового телевизионного вещания с частотной модуляцией при условии согласия заинтересованных администраций. Эти системы не должны создавать плотность потока мощности у поверхности Земли на территории других стран большую -120 дБВт/м^2 для углов прихода менее 20°
1,452...1,492	1, 2, 3	Использование полосы ограничено системами звукового цифрового вещания
2,52...2,67	1, 2, 3	Использование полосы для спутниковой вещательной службы ограничено национальными или региональными системами коллективного приема при условии предварительного согласования с администрациями. В ряде стран, включая Россию, полоса 2535...2655 МГц также распределена для звукового спутникового вещания

Окончание таблицы 1.3

Частота	Район	Примечание
11,7...12,5	1	Должны использоваться в соответствии с планом, принятым ВАКР 1977 г.
11,7...12,2	3	То же
12,2...12,7	2	Должна работать в соответствии с планом, выработанным на Региональной конференции 1981 г. с учетом изменений, принятых на ВАКР-ОРВ 1985 г.
12,5...12,75	4	Ограничена системами коллективного приема с плотностью потока мощности у поверхности Земли — 111 дБВт/м ²
22,5...23	2, 3	Использование разрешено при условии предварительного согласования с заинтересованными администрациями
40,5...42,5; 84...86	1, 2, 3	

Таблица 1.4

Полосы частот подвижной спутниковой службы, ГГц*

Частота	Направление ¹	Частота	Направление ¹
0,137...0,137825	Космос — Земля ²	1,970...1,980 ⁸	Земля — Космос
0,148...0,1499	Земля — Космос ²	1,980...2,010 ⁸	Земля — Космос
0,1499...0,15005	Земля — Космос	2,160...2,170 ⁸	Космос — Земля
0,235...0,322 ³	—	2,170...2,200 ⁸	Космос — Земля
0,3354...0,3999 ⁴	—	2,4835...2,520 ⁸	Космос — Земля
0,40015...0,401 ²	Космос — Земля	2,670...2,690 ⁸	Земля — Космос
0,406...0,4061 ⁵	Земля — Космос	7,250...7,375	Космос — Земля
1,525...1,530	Космос — Земля	7,900...8,025	Земля — Космос
1,530...1,533	Космос — Земля	19,7...20,1 ⁹	Космос — Земля
1,533...1,544	Космос — Земля	20,1...21,2	Космос — Земля
1,544...1,545	Космос — Земля	29,5...30 ⁹	Земля — Космос
1,545...1,555	Космос — Земля	30...31	Земля — Космос
1,555...1,559	Космос — Земля	39,5...40,5	Космос — Земля
1,610...1,6265 ⁶	Земля — Космос	43,5...47	—
1,6265...1,6315	Земля — Космос	66...71	—
1,6315...1,6345	Земля — Космос	71...74	Земля — Космос
1,6345...1,6455	Земля — Космос	81...84	Космос — Земля
1,6455...1,6465	Земля — Космос	95...100	—
1,6465...1,6565 ⁷	Земля — Космос	134...142	—
1,6565...1,6605	Земля — Космос	190...200	—
		252...265	—

¹ Не указанное направление означает возможность использования полосы частот для обеих линий.

² Использование полос 137...138, 148...149,9, 149,9...150,05 и 400,15...401 МГц ограничено негеостационарными спутниковыми системами на условиях координации. Полоса 137,825...138 МГц распределена на вторичной основе.

³ При условии предварительного согласования с заинтересованными администрациями.

⁴ Полосы 312...315 МГц (Земля — Космос) и 387...390 МГц (Космос — Земля) могут также использоваться негеостационарными системами.

⁵ Для радиомаяков, определяющих место бедствия, при использовании мощности не более 5 Вт.

Окончание таблицы 1.4

⁶ На условиях координации по Резолюции 46 (ВАКР-92) с ограничениями параметров по пункту 731 Е Регламента радиосвязи. Полоса 1613,8...1626 МГц также в направлении Космос — Земля на вторичной основе.

⁷ Частоты, распределенные для воздушной подвижной спутниковой службы (R), резервируются для связи между любым воздушным судном и теми станциями воздушной службы, которые в первую очередь предназначены для обеспечения безопасности и регулярности полетов на внутренних и международных линиях гражданской авиации.

⁸ Использование полос частот 1,97...2,01, 2,16...2,2, 2,5...2,52 и 2,67...2,69 ГГц не должно начаться до 2005 г. на условиях координации по Резолюции 46 (ВАКР-92).

⁹ На вторичной основе в Районах 1 и 3 и на первичной основе в Районе 2.

* Все приведенные полосы частот распределены на всемирной основе, если не указано иное.

радиосвязи определяет, что регистрация МСЭ частотных присвоений для этих служб не должна давать приоритета отдельной стране или группе стран и не должна препятствовать созданию и развитию космических систем связи для других стран. Поэтому обязанностью обеих сторон, участвующих в координации, является нахождение взаимоприемлемого решения.

1.6.3. Особенности выбора рабочих частот для радиолиний спутниковой связи

При выборе рабочих частот для радиолиний спутниковой связи (РЛСС) необходимо учитывать:

- условия прохождения радиоволн различных диапазонов через земную атмосферу;
- распределение интенсивности радиоизлучений внешних источников помех (атмосферы, Земли, космоса и т. д.) по диапазону;
- электромагнитную совместимость РЛСС с другими радиотехническими средствами;
- наличие освоенных промышленностью комплектов для создания технических средств в данном диапазоне частот.

Нижняя частота выбранного диапазона должна быть выше максимально применимых (МПЧ) для прохождения через ионосферу при касательном распространении радиоволн относительно поверхности Земли. Под МПЧ понимается наибольшая частота, которая еще может отразиться от ионосферы.

Радиосигналы на частотах выше МПЧ свободно проходят сквозь ионосферу и проникают далее в космическое пространство. Практически величина МПЧ не превышает частоту 100 МГц.

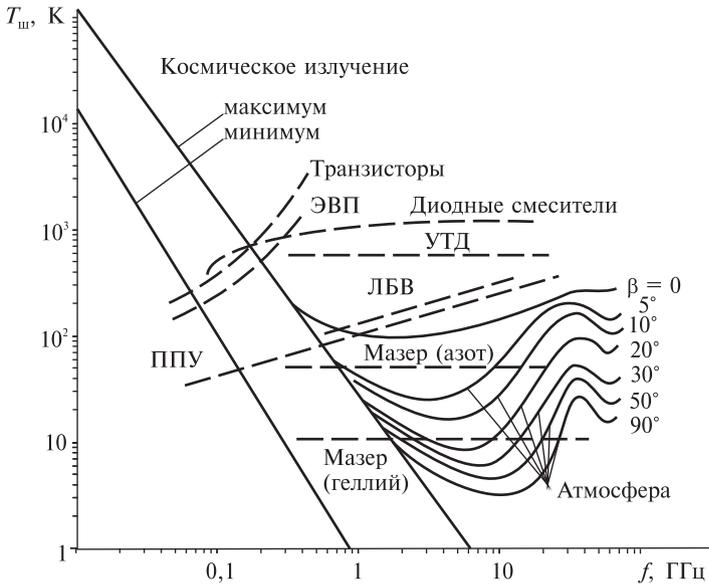


Рис. 1.3. Шумы внешних источников

Еще одним важным фактором, влияющим на выбор нижней границы диапазона для РЛСС, является уровень мощности шумов внешних источников. Сигналы на входах приемников РЛСС из-за большой протяженности линии связи претерпевают большое затухание порядка 10^{20} и более, имеют малую мощность, поэтому в качестве входных каскадов приемников используются малошумящие усилители (МШУ), для которых внешние шумы становятся сравними или превышают собственные шумы.

На рис. 1.3 пунктиром представлены шумовые температуры МШУ различных типов и шумы окружающего пространства в направлении угла наклона к горизонту $\alpha = \beta$. Здесь представлены кривые интенсивности радиоизлучений космоса и атмосферы Земли, причем шумы атмосферы Земли существенно зависят от угла места α антенны ЗС. В настоящее время шумовая температура неохлаждаемых недорогих МШУ в диапазоне 1...4 ГГц составляет не более 20 К, а в диапазоне 10...12,5 ГГц — не более 60...70 К.

Из приведенных данных и рис. 1.3 видно, что уже на частотах 1 ГГц и ниже шумы внешних источников помех (в основном шумы космоса) соизмеримы с шумами МШУ. Если учесть прием антенной теплового излучения почвы, то нижнюю границу частотного диапазона для РЛСС целесообразно ограничить величиной примерно 1 ГГц.

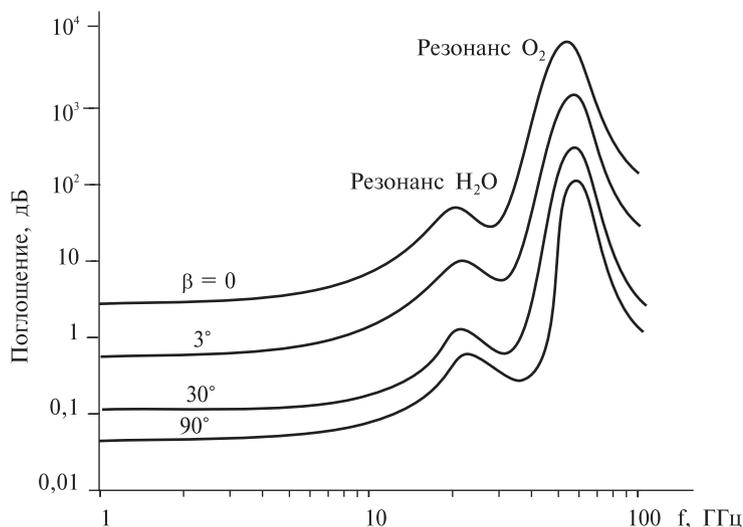


Рис. 1.4. Погонные затухания в атмосфере

Далее рассматриваются факторы, влияющие на выбор верхней границы частотного диапазона для ССС.

Напряженная энергетика и стремление уменьшить габариты, вес и стоимость ретранслятора (РТР) и ЗС требуют увеличения рабочей частоты. Это позволит уменьшить габариты и вес антенных устройств и создаст возможность передачи широкополосных сигналов. Однако на частотах, превышающих 10 ГГц, существенно возрастают атмосферные шумы (рис. 1.3) из-за увеличения затухания радиоволн в атмосфере.

На рис. 1.4 представлена зависимость затухания радиоволн в стандартной атмосфере от частоты сигнала. Однако в настоящее время диапазон частот выше 10 ГГц освоен спутниковыми системами связи, и осваивается диапазон 20...30 ГГц.

К моменту запуска первых ИСЗ и построения РЛСС полоса частот 1...10 ГГц уже интенсивно использовалась в радиолокации, радиорелейной и тропосферной связи. Поэтому для РЛСС в соответствии с рекомендациями МККР, исходя из условия электромагнитной совместимости, внутри этого диапазона отведены отдельные полосы.

Любая радиолиния связи между ЗС через ИСЗ имеют два специфических участка связи: ЗС — ИСЗ и ИСЗ — ЗС. Эти участки в отличие от линий наземной радиосвязи не являются равноценными. Факторы, определяющие выбор частот на участках ЗС — ИСЗ и ИСЗ — ЗС в диапазоне 1...10 ГГц, рассматриваются ниже.

Одной из основных проблем при разработке оборудования спутниковой связи является проблема снижения габаритно-весовых показателей ИСЗ, от которых существенно зависят стоимость и эффективность системы связи. Разумный выбор рабочих частот ИСЗ на прием и передачу позволяет упростить аппаратуру и тем самым повысить надежность РЛСС. Из данных, представленных на рис. 1.3 и 1.4, следует, что с точки зрения внешних шумов и затухания в стандартной атмосфере различные участки диапазона 1...10 ГГц оказываются неравноценными. С возрастанием частоты в пределах этого диапазона увеличивается затухание волн в атмосфере и, следовательно, внешние шумы, определяемые этим затуханием. Поэтому целесообразнее для участка ЗС — ИСЗ выбирать частоты более высокие, нежели на участке ИСЗ — ЗС, поскольку рациональнее увеличить мощность земного передатчика и диаметр антенны, вместо того чтобы усложнять бортовую аппаратуру. Такой выбор оправдывается экономическими соображениями.

Для упрощения схемы и устройства спутникового ретранслятора его полосы частот на передачу и прием должны быть разделены большим защитным частотным интервалом. Поэтому для спутниковой системы связи обычно выбираются отдельные диапазоны частот: один на передачу и другой на прием. Более высокая частота используется на радиолиниях «Земля — Космос», а более низкая частота — на радиолиниях «Космос — Земля». Так, спутниковая система связи диапазона С, соответствующего частотам 4/6 ГГц, использует полосы частот в диапазоне 4 ГГц в линиях «Космос — Земля» и полосы частот в диапазоне 6 ГГц — в линиях «Земля — Космос».

1.6.4. Литерные обозначения диапазонов частот спутниковой связи и сложившееся распределение частот между системами различного назначения

В технической литературе широко используются буквенные литеры диапазонов частот, взятые из радиолокации (табл. 1.5). В таблице в порядке возрастания приведены основные диапазоны частот, используемых в настоящее время спутниковыми системами связи и вещания. Точное разбиение диапазонов частот по литерам выдерживается не всегда строго.

Таблица 1.5

Буквенные литеры диапазонов частот	L	S	C	X	Ku	Ka
Диапазоны частот спутниковой связи, ГГц	0,24...0,4; 1,5/1,6	1,9/2,1; 1,6/2,5	4/6	7/8	11/14	20/30

Диапазон частот 0,24...0,4 ГГц используется для мобильных систем связи военного назначения, в первую очередь для военно-морского флота и военно-воздушных сил.

В диапазоне частот 1,5/1,6 ГГц выделена полоса частот шириной 29 МГц для создания спутниковых систем связи с мобильными объектами: морскими и воздушными судами, автомобилями, для персональной связи. Наиболее крупной системой этого диапазона частот является глобальная международная (с участием России) спутниковая система связи INMARSAT на базе геостационарных КА.

В диапазонах частот 1,9/2,1; 1,6/2,5 ГГц выделены полосы частот шириной порядка 30 МГц для низко- и среднеорбитальных систем мобильной и персональной связи.

Диапазон частот 4/6 ГГц выделен для создания глобальных и региональных сетей связи со стационарными наземными станциями на базе геостационарных КА. Несмотря на выделенную полосу частот шириной 800 МГц, этот диапазон в настоящее время перегружен, и новые системы связи фиксированной спутниковой службы создаются в более высокочастотных диапазонах.

Диапазон частот 7/8 ГГц с полосой 500 МГц используется для военных систем связи со стационарными и мобильными терминалами.

Диапазон частот 11/14 ГГц с полосой 800 МГц выделен для использования в сетях связи со стационарными станциями. В этом же диапазоне частот возможно также создание на вторичной основе сетей связи с мобильными терминалами, за исключением самолетов. В этом диапазоне частот создаются в основном национальные либо региональные системы связи. К настоящему времени этот диапазон близок к насыщению.

Диапазон частот 12 ГГц используется линией связи «Космос — Земля» в полосе 800 МГц, выделенной для геостационарных систем непосредственного теле- и радиовещания на стационарные персональные приемники.

Диапазон частот 20/30 ГГц с полосой 2,5 ГГц выделен для создания геостационарных и негеостационарных систем связи со всеми стационарными и мобильными терминалами, кроме самолетов.

1.6.5. Тенденции использования диапазонов частот

В настоящее время в ССС, расположенных на ГСО, используются главным образом диапазоны частот С, Ku и Ka. Прогнозируемое на 2015 год процентное соотношение количества РТР используемых в С-, Ku- и Ka-диапазонах частот приведено на рис. 1.5.

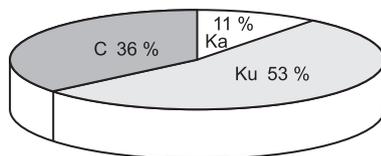


Рис. 1.5. Прогнозируемое процентное соотношение количества РТР используемых в С-, Ку- и Ка-диапазонах частот в 2015 г.

Необходимо отметить, что активное внедрение Ка диапазона началось около 5...6 лет назад. В настоящее время в мире в Ка-диапазоне частот функционирует более двадцати ИСЗ. Можно ожидать появление ИСЗ, работающих в диапазоне частот 40/50 ГГц.

Ожидается активное использование S-диапазона частот для предоставления мобильных мультимедийных широковещательных услуг, в первую очередь в европейских странах.

Вортовое оборудование, работающее в S-диапазоне на частоте 2,2 ГГц, позволит доставлять мобильные мультимедийные широковещательные услуги (мобильное телевидение, цифровое радио и т. д.) непосредственно на пользовательские терминалы. Спутниковая система связи будет являться составной частью гибридной инфраструктуры, сочетающей наземные и космические сети.

Вопросы к главе 1

1. Что такое орбита движения ИСЗ?
2. Какие виды орбит используются для ИСЗ связи?
3. В чем состоит особенность ГСО?
4. Какая международная организация занимается рациональным распределением частот в спутниковой связи?
5. Какие диапазоны частот используются в настоящее время в современных спутниковых системах связи?
6. Почему на линии Земля-ИСЗ применяются более высокие частоты, чем на участке ИСЗ-Земля?
7. Каков принцип действия ИСЗ связи?
8. Назовите основные компоненты спутниковой линии связи.
9. Назовите основные типы многостанционного доступа.
10. Назовите основные виды модуляции, используемой в ССС.
11. Назовите основные виды бортового оборудования ИСЗ связи.
12. Назовите основные виды оборудования ЗС ССС.
13. Назовите основные диапазоны частот ИСЗ связи на ГСО.
14. Что происходит с ослаблением сигнала на линии связи с ИСЗ с повышением рабочей частоты?

2 Службы спутниковой связи

Следует отметить, что до сих пор сохраняется деление на службы связи, введенное Регламентом радиосвязи, однако в силу ряда причин (как технических, так и исторических) оно уже не соответствует реальной структуре современных ССС. Процесс персонализации устройств связи (т. е. максимального приближения средств связи к конечному пользователю) привел к тому, что границы между традиционными службами ФСС и ПСС или ФСС и РСС постепенно стираются. Так, персональные терминалы земных станций для удаленных пользователей Ku- или Ka-диапазонов формально относятся к классу ФСС (работают в полосах частот, выделенных для ФСС), но по своему назначению и выполняемым функциям они ближе всего к ПСС, поэтому следует отдельно рассматривать системы для услуг персональной и широкополосной связи.

2.1. Фиксированная служба связи

Системы ФСС предназначены для обеспечения связи между пользователями, локализованными стационарно. Первоначально они разрабатывались исключительно для организации магистралей большой протяженности и региональной (или зонной) связи. Такие системы на основе терминалов типа VSAT используются в сетях электронной коммерции, обмена банковской информацией, оптовых баз, торговых складов и др. Кроме того, в системах ФСС все чаще применяется оборудование персональной связи и интерактивного обмена информацией (в том числе через Интернет). Для систем ФСС в настоящее время используются следующие диапазоны частот: С (4/6 ГГц), Ku (11/14 ГГц) и Ka (20/30 ГГц) [1].

К разряду ФСС относят также связь по фидерным линиям, формирующим высокоскоростные каналы связи между наземными станциями (центральными, сопряжения и др.). Эти каналы работают в этих же трех диапазонах частот.

Услуги ФСС предоставляют пять крупных международных организаций и около 50 региональных и национальных компаний. К на-

иболее значительным коммерческим системам фиксированной связи относятся системы связи Intelsat, Intersputnik, Eutelsat, Arabsat и AsiaSat.

Среди них бесспорным лидером является международная система Intelsat, орбитальная группировка которой охватывает четыре основных региона обслуживания — Атлантический (AOR), Индийский (IOR), Азиатско-Тихоокеанский (APR) и Тихоокеанский (POR). За годы существования системы Intelsat создано более десяти поколений спутников, из которых каждое последующее по своим техническим возможностям существенно превосходит предыдущее. В своем коммерческом развитии консорциум Intelsat поглотил несколько крупных спутниковых организаций, таких, например, как PanAmSat.

Через спутники системы Intelsat передаются примерно 2/3 международного телефонного трафика. Наземный сегмент включает в себя около 800 крупных станций, размещенных в 170 странах мира.

Международная организация Intersputnik в настоящее время использует российский космический сегмент (он состоит из КА типа «Горизонт» и «Экспресс»).

К наиболее крупным региональным системам относятся Eutelsat (обслуживающая Европу и Северную Африку), Apstar, Asiasat, Optus, Palapa (Азиатско-Тихоокеанский регион) и Arabsat (Арабские страны).

2.2. Подвижная спутниковая связь

Системы ПСС появились около 30 лет назад. Так, первая глобальная система мобильной радиотелефонной связи и геостационарный КА Marisat разработана компанией Comsat в середине 70-х гг., т.е. значительно позднее, чем системы ФСС. Причиной этому были низкая энерговооруженность подвижных объектов и сложные условия их эксплуатации (необходимость учета рельефа местности, ограничения по размерам антенн и др.).

Обычные стационарные наземные станции обеспечивают устойчивую связь при рабочих углах антенн ЗС даже 5° , а надежную связь для подвижных абонентов можно гарантировать лишь при значительно более высоких значениях углов наклона антенны к горизонту. Большие углы радиовидимости КА относительно горизонта позволяют снизить энергетический запас радиолинии, предназначенный для компенсации потерь, которые вызваны замиранием сигналов при распространении радиоволн в ближней зоне со сложным рельефом местности.

Первоначально мобильные наземные станции разрабатывались как системы специального назначения (морские, воздушные, автомобильные и железнодорожные) для ограниченного числа пользовате-

лей. Мобильные ССС первого поколения строились с использованием геостационарных КА с прямыми (прозрачными) ретрансляторами и имели низкую пропускную способность. Для передачи информации они использовали аналоговые методы модуляции.

Подсистемы ПСС создавались в основном для сетей с радиальной или радиально-узловой структурой и большими центральной и базовыми станциями, обеспечивающими работу с подвижными наземными станциями. Потоки информации в сетях с предоставлением каналов по требованию были невелики, поэтому в них применялись преимущественно одно- или малоканальные наземные станции. Обычно такие сети предназначались для связи ведомственных и корпоративных организаций с удаленными и подвижными объектами (судами, самолетами, автомобилями и т. д.), а также для связи государственных структур, в районах бедствия и при чрезвычайных ситуациях.

Качественный скачок в развитии ПСС произошел в связи с внедрением цифровых методов передачи речи и данных и появлением первых проектов спутниковых систем на базе КА на низких круговых и средневысотных орбитах. Орбиты таких спутников низко расположены относительно поверхности Земли, и это дает возможность использовать вместо традиционных земных станций дешевые малогабаритные терминалы с небольшими антеннами. Применение низко- и среднеорбитальных КА позволяет решить проблему «перенаселения» геостационарных орбит и существенно расширяет сферу телекоммуникационных услуг спутниковых сетей с обеспечением пользователей глобальной персональной связью и терминалом типа «телефонная трубка».

Сейчас в мире насчитывается более 30 национальных и международных (региональных и глобальных) проектов, использующих КА на низковысотных орбитах. Наиболее известными из них являются Globalstar, Iridium, Orbcomm (США), а также российские «Гонец» и «Сигнал».

Переход на низкоорбитальные системы нельзя считать генеральной тенденцией развития мобильной спутниковой связи. Традиционные системы, использующие КА на геостационарных орбитах, не сдают свои позиции, о чем говорят последние разработки, использующие новейшие технологии в области антенной техники и обработки сигнала на борту. Наиболее мощная орбитальная группировка систем ПСС с геостационарными спутниками принадлежит международной системе Inmarsat, обслуживающей четыре региона — Атлантический восточный (AOR-E), Атлантический западный (AOR-W), Индийский (IOR) и Тихоокеанский (POR). Каждый из этих районов обслужи-

вается одним действующим КА и имеет по 1–2 резервных спутника. Сеть Inmarsat обеспечивает покрытие практически всей наиболее населенной поверхности Земли, за исключением приполярных районов. Наиболее компактные терминалы Inmarsat имеют размеры ноутбука. Первой системой спутниковой мобильной связи с использованием геостационарного спутника и терминалами размером с сотовый телефон стала система Thuraya. Ключевым технологическим новшеством в спутнике Thuraya стало применение уникальной антенной системы с отражающим зеркалом диаметром 16 м, обеспечивающая формирование 250–300 «узких» лучей. Эта возможность реализована за счет использования на борту цифровой диаграммообразующей схемы, позволяющей изменять конфигурацию лучей в зоне покрытия или создавать новые лучи. Коммерческая эксплуатация данной системы показала ее высокую эффективность, и стали появляться новые системы, использующие схожие технологии. ПСС, использующие в качестве ретранслятора геостационарный спутник, как показала практика, более надежны и экономичны по сравнению с ПСС, использующими низкоорбитальные и среднеорбитальные группировки спутников.

Особенностями современных систем ПСС являются:

- интеграция с традиционными наземными системами подвижной связи и в первую очередь — с цифровыми сотовыми;
- совместимость и взаимодействие сетей подвижной спутниковой радиосвязи с телефонной сетью общего пользования (ТФОП) на любом иерархическом уровне — местном, внутризональном, между-городном;
- взаимодействие с наземными сетями передачи данных и в первую очередь с сетью Интернет;
- многообразии типов абонентских терминалов: стационарных, портативных, мобильных, необслуживаемых и т. д.

Регламентом радиосвязи для систем ПСС выделены диапазоны частот до 1 ГГц, а также полосы частот в диапазонах L (1,5/1,6 ГГц) и S (1,9/2,2 и 2,4/2,5 ГГц). В перспективе для систем ПСС могут быть использованы и более высокочастотные диапазоны Ka (20/30 ГГц) и EHF (40...50 ГГц).

В настоящее время еще сохраняется деление систем ПСС по видам передаваемой информации на сети радиотелефонной связи и системы передачи данных.

Особое место в системах передачи данных занимают сети на базе спутников little LEO, предназначенных для передачи данных со скоростью от 1,2 до 9,6 кбит/с. Их особенностями являются диапазон рабочих частот до 1 ГГц и легкие КА весом 50...250 кг. К бортовой

аппаратуре little LEO не предъявляются жесткие требования по времени доставки сообщений.

Для передачи данных достаточно одного спутника с электронным «почтовым ящиком» на борту. С каждым витком он появляется над новым районом Земного шара, обеспечивая тем самым глобальное покрытие территории. Однако качество такого обслуживания будет определяться количеством КА в системе, поскольку для передачи данных в режиме электронной почты необходимы от 6 до 48 КА. Системы этого класса обладают следующими особенностями:

- передача данных в пакетном режиме в виде коротких сообщений с предоставлением каналов по требованию или в режиме группового опроса;
- применение легких и портативных терминалов с ненаправленными антеннами;
- возможность группового вывода на орбиту КА из-за их малого веса;
- низкие тарифы связи по сравнению с другими системами передачи данных.

Системы группы little LEO ориентированы на глобальный мониторинг средств перевозки грузов со сквозным контролем от пункта загрузки до пункта назначения. Они позволяют определять географические координаты подвижных объектов в режиме реального времени, осуществлять сбор данных об окружающей среде, а также обеспечивать связь со всеми видами подвижных объектов, в том числе возможен двусторонний обмен данными. В настоящее время развернуты орбитальные группировки двух таких систем — Orbcomm (США) и «Гонец-Д1» (Россия).

2.3. Радиовещательная спутниковая служба

Радиовещательная спутниковая служба предназначена для приема абонентами телевизионных и радиовещательных программ и является главной службой систем непосредственного телевизионного вещания (НТВ), спутникового телевизионного вещания и спутникового непосредственного радиовещания [5].

В настоящее время все системы телерадиовещания используют спутники на геостационарной орбите. В этой области основным требованием к системе связи является требование сплошного покрытия обслуживаемых территорий, в этом в наибольшей степени проявляются преимущества ССС перед другими средствами связи.

Важным направлением развития спутникового телерадиовещания является интерактивное телевидение, позволяющее удовлетво-

ритель индивидуальные запросы пользователей трансляцией по спутниковым каналам заказных телепрограмм и предоставлением возможностей интерактивного обмена в процессе телепередач. В таком случае пользователь из пассивного потребителя вещательной информации превращается в активного.

Еще одно перспективное направление — прямое спутниковое вещание на компьютеры (служба Direct PC), позволяющее передавать по радиоканалам телевизионные изображения со скоростью до 30 Мбит/с и информацию Интернета со скоростью до 400 кбит/с.

2.4. Персональная широкополосная спутниковая связь

Системы широкополосной связи на основе LEO-, MEO- и GEO-орбит служат для передачи высококачественной речи, высокоскоростных потоков данных, мультимедийной информации, для доступа в Интернет.

Аналитики считают, что главная услуга широкополосных сетей — это обмен данными в интерактивном режиме. По их прогнозам, уже через 10...15 лет рынок средств широкополосной связи будет таким же развитым, что и существующий рынок средств узкополосной связи. Судя по анонсированным характеристикам намеченных к введению ССС, они смогут удовлетворять 20...30 % потребностей рынка. Реально действующие в настоящее время ССС пока еще не обладают пропускной способностью, которая может обеспечить хотя бы минимальные потребности рынка.

Для современных систем широкополосной связи наиболее характерны два вида услуг — персональная связь и организация широкополосных магистралей в сетях различного назначения, в том числе транкинговых или сотовых. Первый тип услуг обеспечивает связь в режиме реального времени с предоставлением каналов по требованию (bandwidth-on-demand) со скоростью передачи информации до 2...10 Мбит/с.

Ко второму виду услуг относится передача потоков информации с высокой скоростью 155,52 Мбит/с, типичной для сетей синхронной цифровой иерархии (SDH). Здесь речь идет не о замене волоконно-оптических каналов, а о расширении их возможностей для связи с удаленными пользователями или для разрешения проблемы «последней мили», особенно в труднодоступных слабо населенных районах. Высокоскоростную передачу данных предполагается реализовать в системах с КА как на геостационарной орбите, так и на средне- или низковысотных орбитах.

Вопросы к главе 2

1. Какие виды служб спутниковой связи Вам известны?
2. Каковы особенности фиксированной службы спутниковой связи?
3. Когда появилась подвижная спутниковая связь и чем она отличается от фиксированной?
4. В чем особенности персональной спутниковой связи?
5. Какие недостатки имеет персональная спутниковая связь?
6. Назовите основные технические особенности системы персональной спутниковой связи.
7. Каковы особенности широкополосной спутниковой связи?
8. Каково основное функциональное назначение широкополосных спутниковых систем связи?

3 Виды спутниковых ретрансляторов

3.1. Схемы ретрансляторов

Основным элементом спутника связи является бортовой ретранслятор (БРТР) — радиотехническое приемопередающее устройство, устанавливаемое на ИСЗ и предназначенное для приема сигналов от передающей земной станции (одной или нескольких), их усиления и дальнейшей передачи в направлении приемной земной станции (одной или нескольких). Большинство спутников связи и вещания представляет собой многофункциональные устройства, содержащие несколько трактов (или стволов), подключенных к нескольким антеннам. Возможны варианты построения схемы одного ствола с учетом характера преобразования принимаемого сигнала.

БРТР гетеродинного типа наиболее часто встречается в практике спутниковой связи и вещания. Ширина полосы пропускания такого БРТР, как правило, не превышает 40...80 МГц, а основное усиление обеспечивается в тракте преобразования частоты (ПЧ), в ряде случаев выбираемой в пределах 70...120 МГц. В таком БРТР обычно два преобразования частоты: понижающее и повышающее.

БРТР с однократным преобразованием частоты (в технической литературе встречаются названия: линейный БРТР, БРТР прямого усиления). В нем только одно преобразование частоты принимаемого сигнала, в результате которого спектр сигнала переносится с частоты приема в область частот сигналов, передаваемых на земные станции. Преимущество такой схемы — в ее простоте и широкополосности, причем ширина полосы пропускания может достигать до 80...120 МГц. Однако недостатком такой схемы является трудность ее технической реализации, связанная с необходимостью реализации высокого усиления на одной из частот. При типичных для большинства линий связи уровнях передаваемых и принимаемых сигналов необходимо реализовать в БРТР усиление порядка 120 дБ, что довольно затруднительно из-за необходимости обеспечения устойчивости в работе.

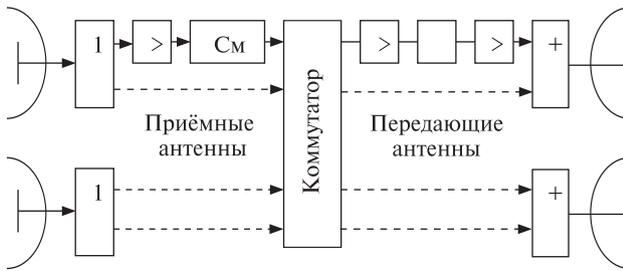


Рис. 3.1. БРТР с обработкой сигнала на борту

БРТР с демодуляцией (или обработкой) сигнала на борту.

На ранней стадии при использовании аналоговых систем подобные ретрансляторы применялись, как правило, для передачи специальных видов информации. При передаче цифровых сигналов их обработка на борту, включающая демодуляцию, коммутацию цифровых потоков и регенерацию, становится обычным режимом.

На борту современных связных ИСЗ обычно устанавливают несколько приемных и передающих антенн. Это необходимо для согласования контуров зон обслуживания бортовых антенн с размещением земных станций на поверхности Земли, чтобы не рассеивать бесполезно энергию на необслуживаемые территории. Высокая направленность приемных и передающих бортовых антенн ИСЗ способствует уменьшению взаимных помех при одновременной работе с другими системами связи — спутниковых и наземных и повышает эффективность использования геостационарной орбиты.

Сигнал от приемной бортовой антенны поступает на вход малошумящего усилителя (МШУ), имеющего смесители и усилители на малошумящих транзисторах. Принятый сигнал усиливается сначала на частоте приема, а потом на промежуточной частоте и частоте передачи. В современных ИСЗ осуществляется обычно однократное преобразование с приемной на передающую частоту [1].

В схеме могут применяться также устройства разделения, коммутации, объединения сигналов (коммутатор на рис. 3.1), цель которых — подавать сигналы, адресованные тем или иным ЗС, на передающие антенны, обслуживающие соответствующие зоны обслуживания. Перспективны системы спутниковой связи с применением быстродействующей переориентации узкого луча антенны (с коммутацией луча), что позволяет осуществлять связь со многими ЗС через остро-направленные антенны, не увеличивая число антенн на борту ИСЗ, с многократным использованием полосы частот.



Рис. 3.2. Структурная схема ствола ВРТР с перестройкой по частоте

На рис. 3.1 не показаны резервные элементы и устройства переключения резервов. Эти схемы достаточно разнообразны и сложны, а степень резервирования различна для разных элементов тракта в зависимости от их надежности и важности с точки зрения обеспечения жизнеспособности ИСЗ и необходимого срока его службы.

В некоторых случаях на космической станции выполняется и более сложная обработка сигналов с преобразованием вида модуляции, регенерацией сигналов, передаваемых в дискретной форме.

Для обеспечения высокой надежности системы и уменьшения эксплуатационных затрат должна быть предусмотрена возможность замены любого из спутников группировки резервным, для чего стволы ВРТР должны иметь возможность оперативной перестройки по частоте по командам с Земли. Структурная схема ствола с оперативной перестройкой его центральной частоты приведена на рис. 3.2. Перестройка частоты осуществляется изменением частоты гетеродина, который является общим для входного понижающего и выходного повышающего преобразователей частоты. Достоинством этой схемы является компенсация нестабильности частоты перестраиваемого гетеродина, что существенно упрощает его техническую реализацию.

По такому принципу реализованы стволы отечественного спутника непосредственного ТВ вещания типа «Галс».

ВРТК с обработкой сигнала на борту. Существуют также бортовые радиотехнические комплексы (ВРТК) с обработкой сигналов на борту. Упрощенная схема ВРТР с обработкой сигнала показана на рис. 3.3. Такие ретрансляторы могут использовать преобразование вида многостанционного доступа на линиях связи вверх и вниз.

При обслуживании широкой контурной зоны наиболее эффективным видом многостанционного доступа на линии вверх является МДЧР (многостанционный доступ с частотным разделением), при котором каждая ЗС сети передает сигналы в отведенном ей участке полосы частот ретранслятора. Требуемое значение ЭИИМ конкретной

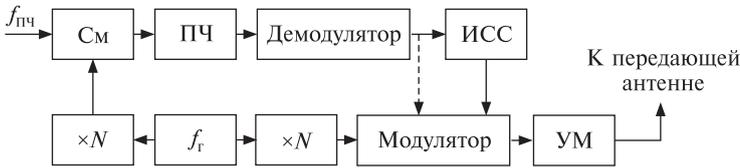


Рис. 3.3. Упрощенная схема БРТР с обработкой сигнала

ЗС определяется количеством информации, которое она должна передать, форматом используемых радиосигналов, добротностью приема бортового приемника и др.

На линии вверх может также применяться МДВР (многостанционный доступ с временным разделением) со многими несущими, называемый МДВР/МДЧР.

Основной недостаток МДЧР на линии вниз — это уменьшение пропускной способности по сравнению с односигнальным режимом, вызванное необходимостью снижения мощности выходного усилителя на 3...6 дБ из-за появления интермодуляционных помех.

Выходные каскады бортовых передатчиков желательно использовать в режиме, близком к насыщению, что позволяет максимально повысить энергетические возможности линии вниз. Для этого в БРТК производится обработка принимаемых сигналов каждой из ЗС, работающих в данной системе связи. Для этого осуществляется:

- демодуляция;
- регенерация, позволяющая уменьшить влияние шумов на линии вверх;
- мультиплексирование отдельных цифровых сигналов в общий поток;
- модуляция на центральной частоте ствола передачи.

На линии вниз передается при этом сигнал в формате МДВР, и выходные каскады ретранслятора переводятся в односигнальный режим работы [6].

3.2. Применение многолучевых бортовых антенн

При использовании многолучевых антенн узкие лучи бортовых приемных и передающих антенн на поверхности Земли образуют множество зон обслуживания, частоты между которыми распределены по гексагональному принципу и поэтому могут многократно повторяться.

В пределах выделенной полосы частот передатчики ЗС конкретной зоны излучают на ИСЗ сигналы в режиме МДВР. Принимаемые на борту сигналы демодулируются, регенерируются, коммутируются

по направлениям требуемых абонентов с группированием сообщений этому же абоненту из других зон обслуживания, модулируются на соответствующих частотах, выделенных этим абонентам, усиливаются и передаются по линиям вниз.

Наличие на борту автоматического коммутатора сигналов по требуемым направлениям связи дает возможность многократного использования выделяемой полосы частот и увеличивает пропускную способность БТРК.

Но в то же время эта бортовая АТС предназначена исключительно для определенного и закрепленного формата радиосигналов, например ФМ-4, на весь срок активного существования спутника, составляющего 12...15 лет, что сдерживает применение в таких спутниковых системах других более прогрессивных видов модуляции.

3.3. Межлучевая коммутация

Процесс организации межлучевой связи предусматривает разделение сигналов, принятых в каждом луче, перераспределение (коммутацию) выделенных сигналов по заданным направлениям и объединение перераспределенных сигналов для передачи в соответствующем луче.

Разделение сигналов может производиться по частоте, по времени или обоим признакам одновременно, возможно также кодовое разделение. Это разделение можно осуществлять до отдельных абонентских каналов или ограничиваться разделением на уровне групп каналов. Второй вариант более экономичен по аппаратурным затратам, но проигрывает первому варианту по степени полезной загрузки каналов связи, особенно в тех случаях, когда перераспределение сигналов осуществляется с помощью фиксированных связей (статическая коммутация).

Перераспределение каналов может быть осуществлено по радиои видеочастоте. Процесс организации межлучевых фиксированных связей по радиочастоте иллюстрируется рис. 3.4.

При МДЧР устройствами разделения являются входные мультиплексеры, при МДВР — схемы выделения пакетов из кадра.

Недостатком схем коммутации с фиксированными связями является отсутствие возможности отслеживания каких-либо изменений трафика, что снижает пропускную способность БРТК. Для отслеживания медленных изменений трафика по направлениям при МДЧР может быть использован коммутатор с трансформацией межлучевых связей по направлениям. Его включают между схемами разделения и объединения сигналов. Этот коммутатор называют статическим,

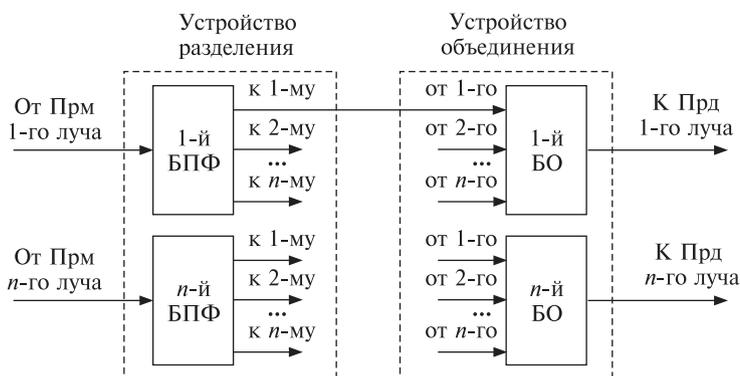


Рис. 3.4. Организация межлучевых связей на борту: БПФ — блок полосовых фильтров; БО — блок объединения

поскольку переключение цепей осуществляется только для трансформации межлучевых связей, а в промежутках коммутатор находится в статическом состоянии. Устройство разделения сигналов должно иметь либо фильтры с различной шириной полосы пропускания, либо число разделительных фильтров в каждом луче должно превышать число лучей n .

Другой способ осуществления трансформации межлучевых связей — изменение объемов информации, направляемых по фиксированным связям (динамическая коммутация). При МДЧР в устройствах разделения используются фильтры с изменяемой шириной полосы пропускания; при МДВР изменяют длительность пакетов, адресованных по соответствующим направлениям.

Произведенные оценки эффективности использования каналов при динамической коммутации показывают, что она может достигать 90 %. Более высокую эффективность реализовать трудно, поскольку на радиочастоте (при большой пропускной способности БРТР) технически сложно осуществить разделение до отдельных абонентских сигналов, а при МДВР невозможно изменять положение временных интервалов и использовать буферные накопители передаваемой информации. При числе лучей более 20 существенно усложняется матрица перетрассировки лучей и возрастает сложность обеспечения необходимых значений переходных затуханий, что также накладывает ограничения на эффективность использования каналов.

Коммутация сигналов в видеоспектре. Реализовать высокую, практически полную загрузку каналов можно при осуществлении коммутации в видеоспектре. В этом случае необходима демодуляция на борту всех коммутируемых сигналов, что связано со значи-

тельным усложнением оборудования. Можно отказаться от матричного исполнения коммутаторов и уплотнить сигналы со всех выходов демодуляторов во времени с объединением в единый поток, а затем разделить его по направлениям. Такой принцип построения коммутаторов (n входов/ n выходов) требует, чтобы число коммутирующих элементов было равно $2n$, а в матричном исполнении — n^2 .

При обработке видеоспектра сигналов возможно применение интегральных схем со сверхвысокой степенью интеграции, что существенно уменьшает объем аппаратуры и потребляемую мощность по сравнению с коммутатором на несущей частоте при такой же размерности. Использование цифровых запоминающих устройств позволяет изменять положение во времени коммутируемых пакетов, чего нельзя реализовать на радиочастоте.

Применение демодуляции и коммутации сигналов на борту целесообразно при сравнительно небольших пропускных способностях ВРТР, исчисляемых несколькими сотнями абонентских каналов.

3.4. Нелинейное усиление ретрансляторов

В большинстве спутниковых систем связи мощность передатчиков существенно ограничена и неэффективность, связанную с каскадами линейного усиления мощности, преодолеть обычно сложно. По этой причине многие спутниковые ретрансляторы используют нелинейные усилители мощности. Эффективное усиление мощности при этом достигается за счет искажения сигнала, вызванного нелинейностью. Основными недостатками нелинейности режима усилителей мощности являются:

1. Комбинационные помехи (intermodulation noise), вызванные взаимодействием несущих. Полезная мощность при этом уменьшается из-за перехода энергии в комбинационные помехи с потерями 1...2 дБ, и при интерференции в канал вносятся паразитные комбинационные произведения. Эта последняя проблема может быть достаточно серьезной.

2. Преобразование амплитудной модуляции в амплитудную модуляцию (AM-to-AM conversion). Это явление типично для нелинейных устройств, подобных лампам бегущей волны. На входе устройства любые флуктуации огибающей сигнала (амплитудная модуляция) подвергаются нелинейному преобразованию и приводят к искажению амплитуды на выходе устройства. Работа лампы бегущей волны в нелинейной области ее характеристик не является оптимальным режимом работы усилителя мощности для схемы, основанной на модулировании амплитуды (такой, как QAM).

3. Преобразование амплитудной модуляции в фазовую (AM-to-PM conversion) — это еще одно явление, общее для нелинейных устройств. Флуктуации в огибающей сигнала приводят к колебаниям фазы, которые влияют на достоверность передачи при использовании схем модулирования фазы (такой, как PSK или DPSK).

4. Ослабление порядка 6 дБ слабых сигналов относительно сильных в ограничителях с резким порогом. В лампах бегущей волны в режиме насыщения подавление слабых сигналов происходит не только из-за ограничения, но и потому, что механизмы усиления сигнала в лампе оптимизированы в пользу более сильных сигналов. В результате этого слабые сигналы могут ослабляться на 18 дБ.

3.5. Поляризация излучений КА

Сведения о поляризации излучений КА способствуют однозначной установке антенного облучателя на необходимую поляризацию электромагнитного сигнала при практической юстировке приемных антенн земных станций.

В современной спутниковой связи используется круговая (левая или правая) и линейная (вертикальная или горизонтальная) поляризации. Значение поляризованной электромагнитной волны обычно привязывается к положению в пространстве вектора напряженности электрического поля \mathbf{Z} в режиме передачи.

Круговая (эллиптическая) поляризация. В документации «Интелсат» **поляризация А** на восходящем направлении (Земля — спутник) является левой, а на обратном (спутник — Земля) направлении — правой круговой. **Поляризация В** на восходящем направлении является правой, а на обратном направлении — левой круговой.

Правая круговая поляризация (RHCP). Если смотреть в направлении распространения волны (от спутника на Землю), то вектор \mathbf{Z} вращается по часовой стрелке в плоскости, перпендикулярной этому направлению.

Левая круговая поляризация (LHCP). Если смотреть в направлении распространения волны (от спутника на Землю), то вектор \mathbf{Z} вращается против часовой стрелки в плоскости, перпендикулярной этому направлению.

В конструкции облучателя и волноводного тракта антенны, предназначенной для приема излучений с круговой поляризацией, осуществляется преобразование приходящей электромагнитной волны с круговой поляризацией в волну линейно поляризованную. Поэтому в общем случае на выходе облучателя должны быть установлены два прямоугольных волноводных порта с соответствующими фланцами для

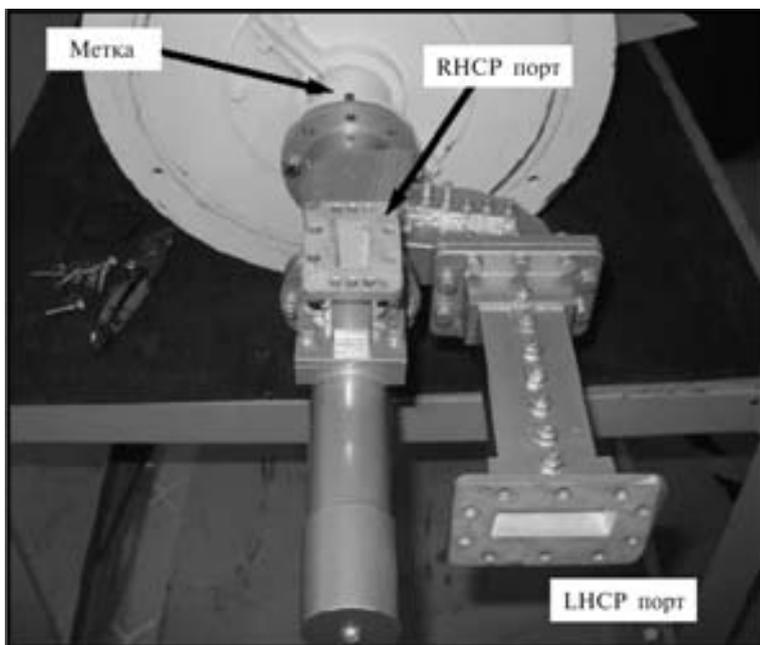


Рис. 3.5. Внешний вид конструкции облучателя с системой разделения сигналов по поляризации

выходов ортогональных линейно поляризованных сигналов и крепления необходимых малошумящих усилителей-конвертеров.

В зависимости от особенностей конструкции поляризационного преобразователя и положения сборки выходных волноводов относительно корпуса антенны возможны несколько вариантов привязки значений поляризованных излучений (RHCP либо LHCP) к волноводным фланцам. В качестве примера приводится конструкция облучателя на диапазон С для антенны компании Andrew серии ESC37T-2CPNC-1 (касегреновского типа).

Линейная поляризация. Линейно поляризованное излучение характеризуется неизменным во времени положением в пространстве вектора \mathbf{Z} электромагнитной волны. В международной спутниковой системе связи Интелсат используются ортогональные вертикальная и горизонтальная линейные поляризации электромагнитной волны. В первом случае вектор \mathbf{Z} находится в вертикальной плоскости по отношению к поверхности Земли, а во втором — в горизонтальной. Если в направлении на спутник (восходящее направление) поляризация линейного спутникового излучения горизонтальная, то в обратном направлении для той же антенны \mathbf{Z} (со спутника) она верти-

кальная. Если в направлении на спутник линейная поляризация излучения вертикальная, то в обратном направлении она для той же антенны горизонтальная. Поэтому вид поляризации для ее однозначного определения всегда рассматривается для режима передачи в направлении распространения сигнала.

Линейная вертикальная поляризация (V). Прием и передача электромагнитного излучения с такой поляризацией осуществляется на облучатель с выходным прямоугольным волноводом, ориентированным широкой стенкой параллельно горизонтальной плоскости.

Линейная горизонтальная поляризация (H). Прием и передача электромагнитного излучения с такой поляризацией осуществляется на облучатель с выходным прямоугольным волноводом с широкой стенкой, ориентированной вертикально.

При позиционировании облучателя для оптимального приема линейно поляризованного излучения необходимо учитывать, что вектор Z на трассе связи повернется в магнитном поле Земли на некоторый угол под воздействием эффекта Фарадея. Кроме того, при перемещении приемной антенны по меридиану восточнее подспутниковой точки с северных широт на экватор угол поворота вектора Z относительно горизонта изменяется от малых значений в северных районах до 90° на экваторе в направлении против часовой стрелки, если смотреть на раскрыв антенны. При передислокации приемной антенны в южном полушарии по меридиану восточнее подспутниковой точки от полярных широт до экватора угол поворота также увеличивается до 90° , но в направлении по ходу часовой стрелки.

При перемещении приемной антенны по меридиану западнее подспутниковой точки с высоких северных широт на экватор угол поворота вектора Z увеличивается от малых значений до 90° в направлении по часовой стрелке, если смотреть на раскрыв антенны. При передислокации приемной антенны в южном полушарии по меридиану западнее подспутниковой точки от полярных широт до экватора угол поворота также увеличивается до 90° , но в направлении, противоположном ходу часовой стрелки.

3.6. Зоны обслуживания

Бортовой ретранслятор спутников связи взаимодействует с земными станциями через приемную и передающую антенны. Эти антенны имеют определенную форму диаграммы направленности, посредством которой на земной поверхности формируется обслуживаемая спутником территория, определяемая как зона обслуживания. Эта зона может быть глобальной, когда обслуживается вся видимая со

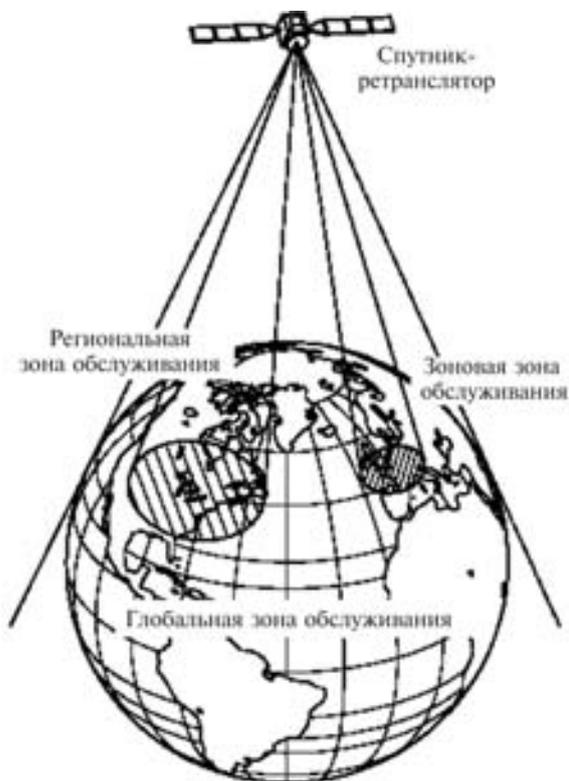


Рис. 3.6. Зоны обслуживания спутника ретранслятора

спутника территория земли, представляющая третью часть всей ее поверхности, либо две половины этой территории, образующие так называемые хемисферы, либо отдельные зонные территории (рис. 3.6) [2].

Зоны обслуживания обычно различаются для различных диапазонов частот, используемых одновременно на одном и том же спутнике. В каждом из частотных диапазонов используется свой частотный план для разделения по частоте отдельных стволов в направлениях Земля — Космос и Космос — Земля (рис. 3.7 и 3.8) [7].

На рис. 3.7 и 3.8 частотные полосы транспондеров обозначены условным знаком в виде трапеции и указана полоса пропускания каждого приемопередатчика. Числа между частотными полосами обозначают защитный интервал. Ряд частот (например, 3950 МГц) используется для слежения за положением спутника на орбите. Стандартные полосы стволов составляют 36, 72, 150 МГц с указанием центральных частот полос транспондеров в режиме приема сигнала на линии Зем-

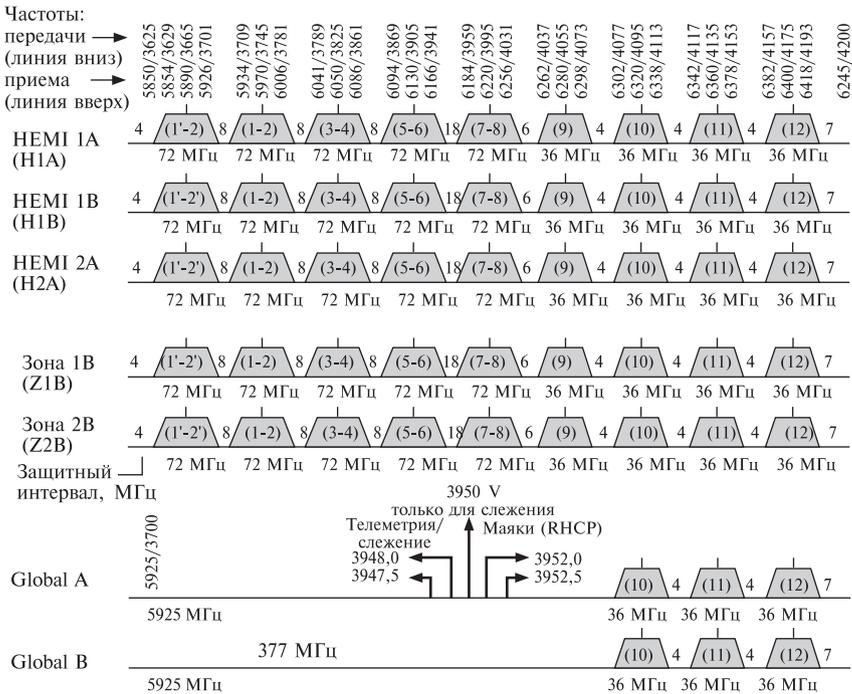


Рис. 3.7. Частотно-пространственная конфигурация ретрансляторов спутника Intelsat-10 в С-диапазоне

ля — Космос и в режиме передачи в направлении Космос — Земля. Транспондеры, представленные друг под другом на разных строках рисунков, используют одни и те же частоты, но подключены к излучателям разных зон обслуживания.

Транспондеры, изображенные на одной строке, подключены к передающей антенне, облучающей одну зону либо хемисферу. В документах Интелсат приняты условные обозначения зон излучения в виде G — Global, H — Hemi, Z — Zone. Обозначается также и вид поляризации поля излучения различных направлений. В диапазоне С (4/6 ГГц) применяется круговая поляризация — правая (RHCP) и левая (LHCP), обозначенные на рисунке соответственно как А и В.

Сигналы транспондеров одинаковых частот разделяются в пространстве за счет обслуживания разных областей земной поверхности, но могут иметь общую зону обслуживания и отличаться видом поляризации. Таким образом осуществляется режим многократного использования одной и той же частоты. Так, например, у спутника Intelsat-6 в диапазоне С (4/6 ГГц) зональное излучение Zone-1 накла-

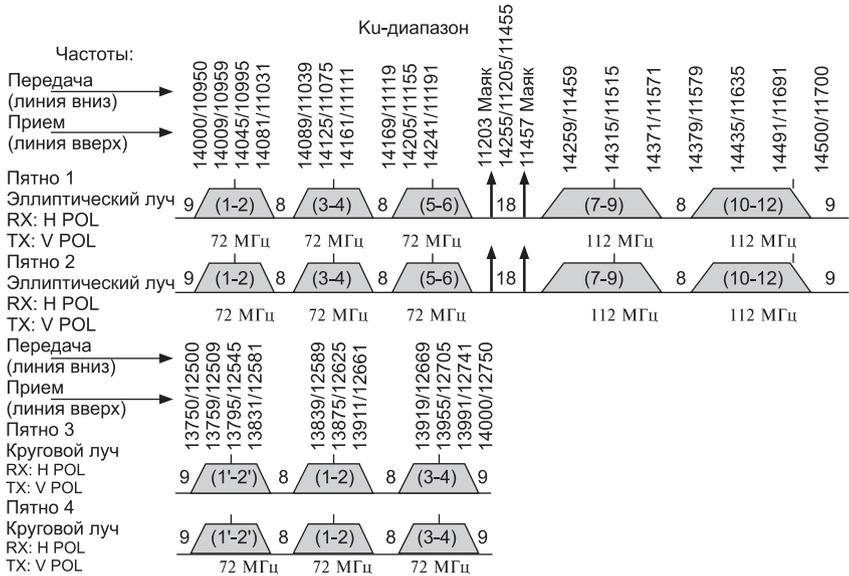


Рис. 3.8. Частотно-пространственная конфигурация ретрансляторов спутника Intelsat-10 в Ку-диапазоне

дывается в пространстве на излучение E-Nemi при одной и той же частоте. В режиме приема эти два различных сигнала одной частоты разделяются с помощью поляризационного фильтра, так как один из них имеет правую, а другой левую круговую поляризацию. Таким образом, спутник Intelsat-6 частоты диапазона C использует шестикратно. Транспондеры глобального излучения обычно работают на несколько более высоких частотах, не совпадающих с зональными и хемисферными, поэтому и не являются помехой для них. На частотном плане транспондеры глобального обслуживания иногда совпадают с зональными, но при этом отдельно указывается, что при работе включаются только одни либо другие при различных конфигурациях схемы коммутации.

Транспондеры диапазона Ku (11/14 ГГц) работают с разделением сигналов при помощи ортогональных линейных поляризаций: вертикальной и горизонтальной. Подключение входов и выходов транспондеров к антеннам того или иного направления излучения осуществляется по специальной схеме коммутации. Коммутация может быть жесткой, выполненной на заводе-изготовителе, или может быть оперативной и изменяться по командам с Земли. Коммутация антенн с помощью коммутационной матрицы без какой либо дополнительной обработки называется коммутацией по СВЧ.

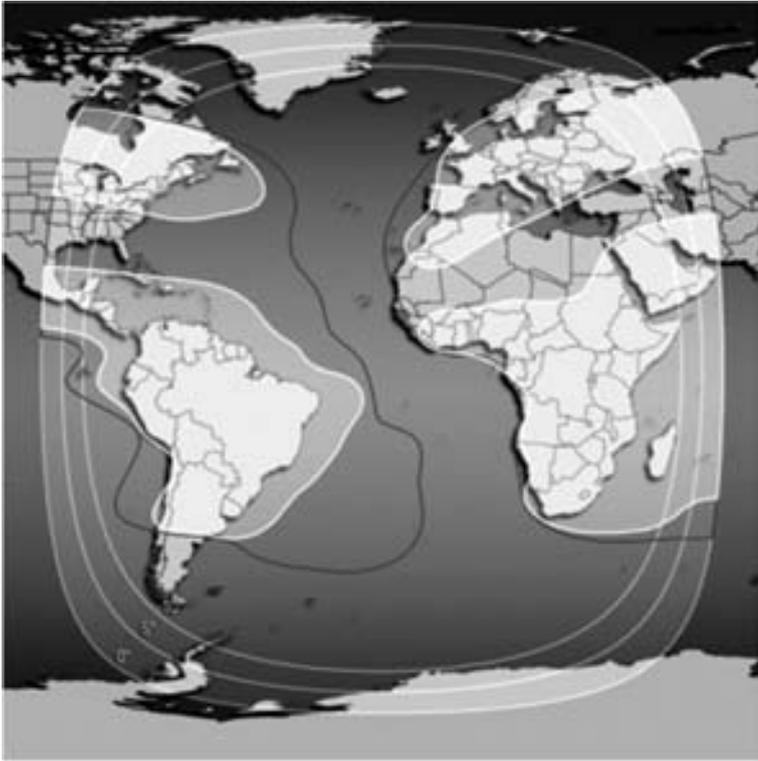


Рис. 3.9. Зоны обслуживания ИСЗ Intelsat-6

На рис. 3.9 приведен для примера вид зоны обслуживания спутника связи Intelsat-6 с обозначением границ размещения ЗС с углами места антенн этих станций 0, 5 и 10°.

Вопросы к главе 3

1. Какие схемы ретрансляторов наиболее распространены в спутниковой связи?
2. В каком энергетическом режиме выгоднее использовать усилители мощности ретрансляторов?
3. С какой целью применяются на борту многолучевые антенны?
4. Что такое поляризация сигнала ССС?
5. Для чего применяются различные виды поляризации?
6. Какие виды поляризации применяются и почему?
7. Что такое зона обслуживания ССС?
8. Какие виды зон обслуживания применяются?

4 Электромагнитная доступность к спутниковым линиям связи

4.1. Возможность электромагнитного доступа

Развитие спутниковых систем связи идет по пути увеличения пропускной способности линий связи при сохранении достоверности передачи информации. Эти же особенности спутниковых систем связи определяют в какой-то степени ее информационную безопасность. При этом, как и ранее, значительная удаленность земной станции от космического аппарата на геостационарной орбите требует принятия специальных мер для обеспечения уверенного радиоприема. Эта задача во многом определяется выбором типов антенн и других важных параметров для выполнения требований электромагнитной доступности.

Одним из требований эффективности линий радиосвязи, которые широко применяются на практике, считают вероятность обеспечения радиосвязи с достоверностью не хуже заданной $P(D \leq D_{\text{доп}})$, где D — потери достоверности. Для заданного вида сигнала и способа его обработки достоверность принимаемой информации определяется превышением эффективного напряжения сигнала над эффективным напряжением помех (шумов) на входе приемника, т. е. величиной $h = U_c/U_{\text{п}}$ или отношением уровней мощности сигнала и шума $h^2 = P_{\text{ш}}/P_c$.

Таким образом, обеспечение радиосвязи с достоверностью не хуже заданной связано с выполнением условия

$$U_c/U_{\text{п}} \geq h \quad \text{или} \quad P_c > P_{\text{ш}}, \quad P_{\text{н}} = h^2 P_{\text{ш}},$$

где $P_{\text{н}}$ — минимально необходимый уровень сигнала на входе приемника для реализации заданного качества связи.

Цель расчета электромагнитной доступности заключается в том, чтобы на основе сформулированного критерия определить условия его выполнения в данной электромагнитной обстановке.

Под электромагнитной доступностью источников радиоизлучений понимается возможность их обнаружения, технического распознавания, приема передаваемой информации с требуемой достоверностью

и надежностью. Причем под достоверностью приема понимают отношение числа правильно принятых слов (фраз) в телефонии и знаков в телеграфии и цифровой связи к числу переданных. На радиоприемах оценка достоверности производится за интервалы времени, в течение которых условия распространения радиоволн должны оставаться практически неизменными. Понятие надежности (вероятности) связи как процента времени приема с требуемой достоверностью на протяжении заданного интервала длительного периода времени, вводится для характеристики устойчивости работы радиоприема. Чем больше этот период, тем больше возможные изменения сигналов и помех из-за изменения условий распространения и других факторов. Поэтому критерий надежности работы должен относиться к определенным периодам времени (к часам суток, дням недели, месяцу, сезону, году и т. п.).

Наличие электромагнитного доступа к требуемым источникам излучения определяет степень безопасности информации, передаваемой по спутниковым системам связи.

Очевидно, электромагнитный доступ к соответствующим спутникам-ретрансляторам может быть обеспечен при условиях:

- наличия технических средств с необходимыми характеристиками;
- определения предполагаемых районов дислокации терминалов приема, в которых должна быть обеспечена необходимая электромагнитная доступность.

Для обеспечения полного и высококачественного радиоприема от спутниковых систем связи должны выполняться два условия.

Первое и основное условие обеспечения электромагнитной доступности заключается в том, что энергетический потенциал приемного комплекса земной станции и уровень мощности сигнала в пункте радиоприема должны соответствовать друг другу, чтобы принимаемый сигнал можно было обнаружить и выделить на общем фоне помех. Это условие распадается на ряд частных условий, требует учета многих факторов, относящихся как к космическому сегменту спутниковых систем связи, так и к техническим характеристикам земных станций. Такими факторами являются:

- мощность бортового передатчика и допуски на ее изменение;
- коэффициент усиления бортовой антенны, ее диаграмма направленности и ориентировка относительно Земли (с учетом нестабильности положения спутника);
- величина потерь при распространении радиоволн от бортовой антенны до пункта радиоприема с учетом метеоусловий и других причин, влияющих на распространение радиоволн;

- коэффициент усиления антенны земной станции радиоприема, ее диаграмма направленности, шумовая температура и точность наведения;
- уровень внешних и внутренних помех, обусловленных всеми причинами, в том числе и потерями сигнала в среде распространения и приемном тракте;
- чувствительность и шумовые параметры приемной аппаратуры;
- выигрыш за счет использования помехозащищенных кодов и демодуляторов.

Второе условие осуществления радиоприема или электромагнитной доступности заключается в том, что аппаратура приема, выделения каналов и регистрации информации по своим техническим характеристикам должна соответствовать показателям, нормативам и стандартам, заложенным в технические характеристики линии связи.

Линии спутниковой связи рассчитываются исходя из необходимости передачи различных видов информации, в том числе цветного телевидения, передачи данных и т. д.

Показатели качества передачи информации по каналам связи определяются с учетом обеспечения передачи наиболее сложных видов информации, а также в расчете на то, чтобы со стороны наиболее требовательных пользователей не было претензий к качеству связи.

Необходимо учесть и ряд особенностей трассы спутниковой связи. Теоретически предельная дальность оптической видимости спутника-ретранслятора определяется касательной к земной поверхности, т. е. направлением при горизонтальной ориентации антенны ЗС. Однако при наклоне приемной антенны под малыми углами, близкими к горизонту, в основной и первые боковые лепестки диаграммы направленности попадает наиболее интенсивное тепловое радиоизлучение Земли и атмосферы, что увеличивает общий уровень шумов. По нормам, принятым в международной системе спутниковой связи Intelsat, станция считается расположенной в зоне видимости спутника связи, если угол места антенны (угол наклона к горизонту) превышает пять градусов. Разумеется, эта граница носит условный характер, прием сигналов от спутников-ретрансляторов возможен и при необходимости осуществляется и под меньшими углами места, однако при этом повышается уровень помех (шумов) на входе приемника ЗС, которые следует учитывать. Кроме того, при выполнении расчетов по энергетике необходимо учитывать метод многостанционного доступа (МСД), так как на энергетические характеристики существенное влияние оказывает применяемый при этом метод модуляции.

Для расчета ЭМД к ССС необходимо знать характеристики излучения ретранслятора спутника, а именно эффективную изотропную излучаемую мощность (ЭИИМ), которая определяется по заявочной характеристике антенны как произведение мощности передатчика на коэффициент направленного действия бортовой антенны. Расчет ЭМД необходим, так как в ряде практических случаев требуется расчет возможности радиоприема от линий спутниковой связи с оценкой возможного качества приема. При расчете ЭМД также учитывается воздействие внеземных источников радиоизлучений, а именно Солнца и Луны, на работу ЗС.

4.2. Помехи в приемном тракте станции космической связи

Для оценки возможности приема и его качества, кроме уровня принимаемого сигнала, необходимо знать еще и уровень помех на входе приемника (МШУ) станции. В конечном счете принятый сигнал может быть многократно усилен, однако при этом одновременно происходит усиление принятых шумов. Известно, что обработка даже достаточно высокого по уровню сигнала может быть затруднена или совершенно невозможна при высоком уровне помех. Именно поэтому для оценки качества приема необходимо пользоваться двумя величинами: уровнем мощности полезного сигнала и уровнем мощности помех, точнее, отношением этих величин, которое обычно называют отношением сигнал/шум, понимая под шумом все виды помех на входе приемника.

Радиопомехи можно разделить на две группы: помехи искусственного происхождения (станционные и промышленные) и помехи естественного происхождения. Если от помех первого вида можно избавиться организационно-техническими мероприятиями, то с помехами естественного происхождения дело обстоит значительно сложнее. К этим помехам можно отнести:

- тепловые шумы собственного приемного тракта;
- тепловые шумы Земли и окружающих приемную антенну предметов;
- тепловые шумы атмосферы;
- радиоизлучения внеземного происхождения (Солнца, Луны, планет, звезд и других космических тел).

Количественно уровень всех этих помех характеризуется суммарной шумовой температурой станции в режиме приема. Целесообразно кратко перечислить отдельные составляющие помех в общем шуме приемной системы.

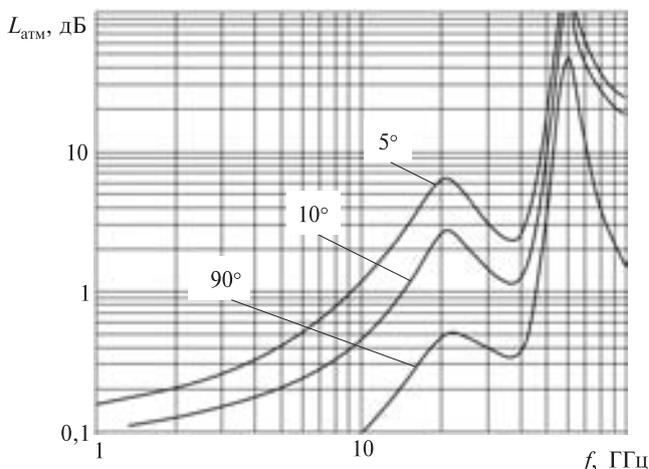


Рис. 4.1. Ослабление радиоволн в атмосфере при различном наклоне антенн

Влияние реальных условий распространения сигнала на энергетику спутниковой линии связи проявляется в дополнительном затухании радиоволн по сравнению с затуханием в свободном пространстве [8] и приводит к увеличению эквивалентной шумовой температуры приемной станции по сравнению с этой температурой в свободном пространстве.

Дополнительные потери зависят от диапазона рабочих частот и увеличиваются с уменьшением угла места антенны α , так как при малых углах наклона антенны к горизонту радиоволны проходят через толщу атмосферы. Дополнительные потери определяются дополнительным, по сравнению со свободным пространством, ослаблением в спокойной атмосфере в сухую ясную погоду, которые еще увеличиваются за счет ослабления в осадках, из-за рефракции радиоволн и поляризационных потерь.

Ослабление в спокойной атмосфере определяется в основном поглощением в кислороде и водяных парах тропосферы и не зависит от времени года. Дополнительное затухание, обусловленное ослаблением в спокойной атмосфере $L_{\text{атм}}$, можно считать постоянным во времени и определять с помощью графика (рис. 4.1). Следует отметить, что дополнительные потери в атмосфере $L_{\text{атм}}$ при больших углах наклона антенны оказываются заметными (несколько дБ) на частотах более 15 ГГц, поэтому в диапазонах частот 14/11 ГГц и ниже можно считать это ослабление малым. Дополнительные потери на затухание в атмосфере могут рассчитываться и с применением специальных формул, которые будут рассмотрены ниже.

Ослабление сигнала в осадках увеличивается при поглощении энергии радиоволн гидрометеорами (дожде, снеге, тумане, пыли и т. д.) и носит статистический характер, зависящий от климатических условий. Этот вид потерь является основной составляющей дополнительных потерь в полосах частот 14/11 ГГц и выше [9]. Потери L_d за счет ослабления в осадках можно рассчитать с помощью учета статистики выпадения осадков различной интенсивности в заданном районе и эквивалентной длины пути радиоволн в дожде при различных углах места антенны ЗС. Для Европейской территории России и других районов с умеренным климатом удобно пользоваться представленными на рис. 4.2 графиками, характеризующими значения $L_{атм}$, превышаемые не более чем в 1 и 0,1 % времени любого месяца.

Рефракция радиоволн приводит к отклонению фактического от истинного направления. В результате появляется дополнительное ослабление сигнала, вызванное неверным наведением антенн ЗС на спутник. Угловое отклонение, вызванное рефракцией, составляет несколько десятых долей градуса и может быть скомпенсировано или сведено к минимуму предварительной коррекцией направленности антенн. При автоматическом наведении антенн по максимуму сигнала влияние рефракции практически исключается. Однако при этом возникают потери из-за неточности наведения антенн, которые зависят от метода и конструкции (включая механическую часть) устройства наведения. Этот вид потерь, строго говоря, носит не поддающийся оценке статистический характер и может увеличить общие потери примерно на 1 дБ в диапазонах частот ниже 6 ГГц. В диапазонах 6/4 ГГц и выше влияние рефракции может не учитываться.

Поляризационные потери складываются из потерь, вызванных несогласованностью поляризации, потерь, связанных с эффектом Фарадея, и потерь из-за деполяризации волн в осадках.

Поляризационные потери. Потери из-за несогласованности поляризаций приемной и передающей антенн возникают в результате изменения взаимной ориентации антенн ЗС и спутника, что имеет решающее значение при использовании ортогональных линейных поляризаций. Возникающие при этом потери могут достигать 10 дБ, однако при ортогональных круговых поляризациях составляющая поляризационных потерь становится пренебрежимо малой.

Потери деполяризации радиоволн в осадках вызваны продолговатой формой и вертикальной ориентацией траектории падения капель дождя. Это приводит к различному влиянию осадков на вертикальную и горизонтальную составляющие радиоволн с круговой поляризацией. Деполяризация радиоволн линейной поляризации вызывает

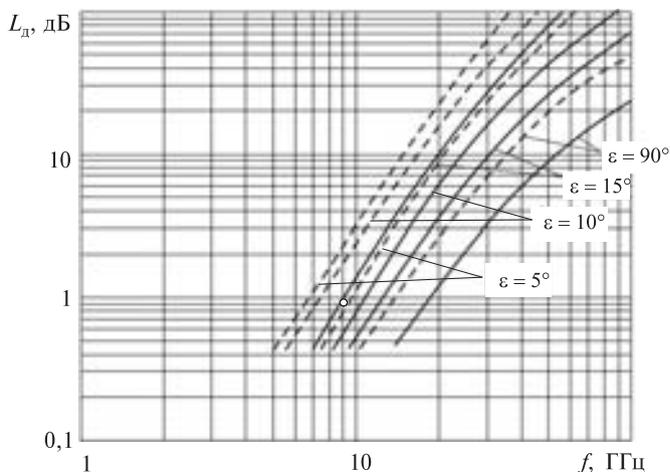


Рис. 4.2. Ослабление радиоволн в осадках на Европейской территории России

меньшие потери, чем в случае круговой. Этот вид потерь также носит статистический характер, связанный со статистикой выпадения дождей.

В целях снижения результирующих поляризационных потерь в диапазонах частот ниже 10 ГГц используется в основном круговая поляризация.

Следует сказать, что в реальных условиях имеют место также флуктуации фазово-частотных характеристик ФЧХ или группового времени задержки (ГВЗ) среды, которые, однако, не превышают 1 нс за большой промежуток времени. Они имеют порядок в несколько сотых долей наносекунд за 1 мин, и это явление необходимо учитывать в процессе выбора параметров кадра при МДВР, поскольку оно косвенным образом может влиять на энергетику.

Таким образом, в наиболее общем случае дополнительные потери в реальных условиях

$$L_{\text{доп}} = L_{\text{атм}} + L_d + L_n + L_{\text{п}},$$

где $L_{\text{атм}}$ — потери в спокойной атмосфере (рис. 4.1); L_d — потери в осадках (рис. 4.2); L_n — потери из-за неточности наведения антенн; $L_{\text{п}}$ — поляризационные потери.

Точный учет этих факторов представляет собой сложную задачу и требует большого объема экспериментальных исследований. В полосах частот 14/11 ГГц и выше дополнительные потери определяются в основном ослаблением в реальной атмосфере. Они изменяются в

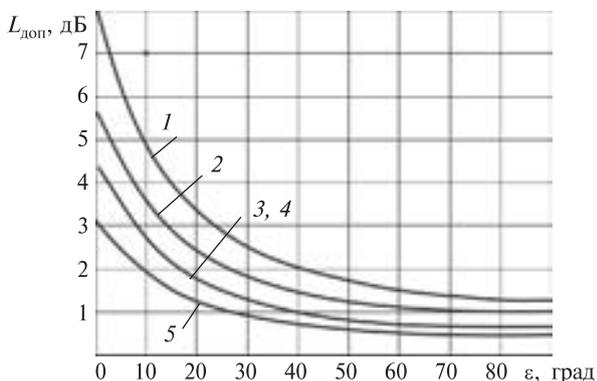


Рис. 4.3. Зависимость дополнительного ослабления от угла места в полосе частот 14/11 ГГц в климатических зонах 1-5

широких пределах в зависимости от географического положения ЗС и ее угла места (рис. 4.3).

При практических расчетах в диапазоне 14/11 ГГц полезно принять во внимание, что между дополнительными потерями на участках «вверх» и «вниз» существует функциональная зависимость: $L_{\text{доп}\uparrow} \approx \approx 1,4L_{\text{доп}\downarrow}$. Аналогичная зависимость существует и между дополнительными потерями, не превышающими в течении более 0,01; 0,3 и 20 % времени:

$$L_{\text{доп}}(20\%) = 0,08L_{\text{доп}}(0,01\%); \quad L_{\text{доп}}(0,3\%) = 0,5L_{\text{доп}}(0,01\%),$$



Рис. 4.4. Климатические дождевые зоны

где $L_{\text{доп}}$ (0,01 %) для различных дождевых климатических зон может лежать в пределах от 4 до 12 дБ (рис. 4.4).

Поскольку по сравнению с затуханием в свободном пространстве дополнительные потери невелики, они не оказывают решающего влияния на энергетику спутниковой линии связи. Поэтому при оценочных расчетах могут быть использованы приближенные методы оценки дополнительных потерь с использованием графиков на рис. 4.1–4.3 с использованием экстраполяции приведенных результатов.

4.3. Шумы приемного устройства

Суммарная эквивалентная шумовая температура приемного устройства заметно влияет на энергетику спутниковой линии связи, так как непосредственно определяет параметр шумовой добротности приемной системы ЗС G/T, характеризующей энергетический потенциал приемной станции. Ее значение определяется отношением коэффициента усиления антенны в режиме приема с учетом затухания в тракте к суммарным шумам антенны, волноводного тракта приемной станции и собственными шумами приемника и измеряется в дБ относительно градуса Кельвина. Для практических расчетов все составляющие суммарной шумовой температуры приемной системы пересчитываются к облучателю приемной антенны:

$$T_{\Sigma} = T_A + T_0(1/\eta_{\text{тп}} - 1) + T_{\text{пр}}/\eta_{\text{тп}},$$

где T_A — шумовая температура антенны, К; $T_0 = 290$ К — абсолютная физическая температура окружающей среды; $\eta_{\text{тп}}$ — коэффициент передачи (по мощности) первого участка АВТ (до входа МШУ); $T_{\text{пр}}$ — собственная шумовая температура приемного устройства (МШУ), К.

В свою очередь шумовая температура антенны ЗС

$$T_A = T_{\text{атм}}(\varepsilon) + cT_3 + T_{\text{косм}}(\varepsilon),$$

где $T_{\text{атм}}(\varepsilon)$ — шумовая температура, обусловленная шумами атмосферы и зависящая от угла места антенны ε ; T_3 — шумовая температура теплового излучения Земли, равная 290 К; $T_{\text{косм}}(\varepsilon)$ — шумовая температура, обусловленная шумами космического происхождения; c — коэффициент, учитывающий усредненный уровень боковых и задних лепестков диаграммы направленности антенны.

Шумовая температура атмосферы определяется с учетом спокойной атмосферы и влияния осадков. Тепловое излучение среды объясняется законом термодинамического равновесия, согласно которому среда (почва, атмосфера, осадки) излучает в радиотехническом диапазоне такое же количество энергии, какое поглощает. Таким образом,

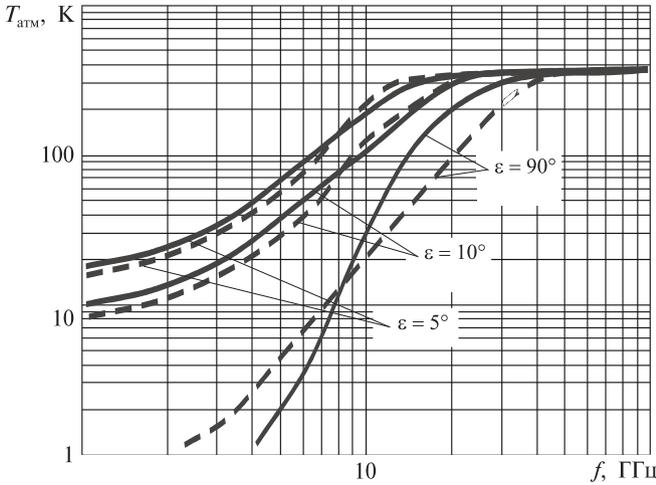


Рис. 4.5. Зависимость шумовой температуры атмосферы (с учетом осадков) от частоты и угла места

эта составляющая носит статистический характер, связанный с потерями в спокойной атмосфере и дождях, и зависит от частоты и угла места (рис. 4.5).

При известном затухании, обусловленном влиянием атмосферы, шумовая температура атмосферы

$$T_{\text{атм}}(\varepsilon) = 290(1 - 1/L_{\text{атм}\Sigma}),$$

где $L_{\text{атм}\Sigma} = L_{\text{атм}} + L_{\text{д}}$ — суммарное затухание в атмосфере с учетом поглощения в осадках для соответствующего угла места.

Составляющая шумов антенны от теплового излучения земли T_3 при углах наклона антенны от $5...7^\circ$ до 90° обусловлена его приемом боковыми и задними лепестками. За счет боковых лепестков увеличение температуры шумов антенны земной станции можно приближенно оценить по формуле

$$cT_3 = 23 + 0,2(90^\circ - \varepsilon),$$

где ε — угол места приемной антенны.

Шумы космического происхождения определяются в основном излучениями Галактики, Солнца и Луны. При этом усредненная температура шумов Галактики пренебрежимо мала в диапазоне частот $6/4$ ГГц и выше и не превышает нескольких градусов Кельвина на частотах более 2 ГГц при любых углах места [10]. В то же время излучение Солнца может полностью нарушить связь при попадании в

главный лепесток диаграммы направленности антенны. Однако влияние этого явления можно свести к минимуму с помощью предварительного расчета моментов времени наиболее опасного для работы ЗС периода времени. Излучение Луны оказывает еще меньшее влияние, так как ее шумовая температура на несколько порядков ниже шумовой температуры Солнца. Таким образом, проведя необходимые расчеты и приняв должные меры, составляющую $T_{\text{косм}}(\varepsilon)$ в оценочных расчетах можно принять равной нулю.

Шумовая температура приемного тракта в основном определяется шумовой температурой МШУ.

Шумовые характеристики сложных устройств, составляющих приемный тракт, удобно оценивать путем пересчета шумов, вносимых отдельными его элементами в одну общую точку, обычно на вход приемного устройства (МШУ) или на вход антенны (облучателя):

$$T_{\text{штр}} = T_0(1/\eta_{\text{тр}1} - 1) + T_{\text{пр}}/\eta_{\text{тр}1},$$

где $\eta_{\text{тр}1}$ — коэффициент передачи первого участка АВТ (до входа МШУ); $T_0(1/\eta_{\text{тр}1} - 1)$ — шумовая температура фидера от облучателя до входа МШУ; $T_{\text{пр}}$ — температура шума тракта от МШУ до РПУ, приведенная ко входу МШУ.

Для расчета $T_{\text{пр}}$ можно пользоваться выражением

$$T_{\text{пр}} = T_1 + \frac{T_2}{K_1} + \frac{T_3}{K_1 K_2} + \dots + \frac{T_n}{K_1 K_{n-1}}, \quad (4.1)$$

где T_i , K_i , $i = 1, \dots, n$, — температура шума и коэффициенты передачи активных и пассивных элементов. Как видно из (4.1), на суммарную шумовую температуру T_{Σ} существенное влияние оказывает затухание первого участка антенно-волноводного тракта (АВТ) от облучателя до входа МШУ.

Важное влияние на результирующую (суммарную) шумовую температуру приемной системы оказывают шумы собственного приемного устройства, в основном определяемые шумовой температурой МШУ.

В настоящее время применяется несколько типов малощумящих усилителей. В спутниковой связи уже давно не используются охлаждаемые параметрические усилители, поскольку технический прогресс сделал возможным реализацию параметров неохлаждаемых усилителей, близких к параметрам охлаждаемых.

Следует отметить, что охлаждаемые параметрические малощумящие усилители достаточно сложны и неудобны в эксплуатации и имеют большие габариты по сравнению с неохлаждаемыми. Сравнение параметров МШУ различного типа приведено на графиках рис. 4.6.

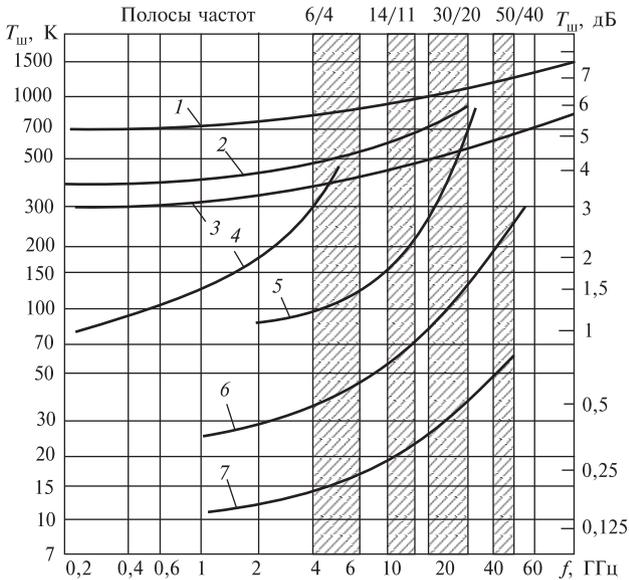


Рис. 4.6. Шумовые характеристики различных типов МШУ в зависимости от частоты: 1 — диодный смеситель; 2 — усилитель на туннельном диоде; 3 — смеситель с восстановлением зеркального канала; 4 — усилитель на биполярном транзисторе; 5 — усилитель на полевом транзисторе; 6 — параметрический неохлаждаемый МШУ; 7 — параметрический охлаждаемый МШУ

Шумовую температуру фидера можно уменьшить только путем сокращения его длины и использования волноводов с минимальными потерями, а шумовую температуру приемной системы $T_{\text{пр}}$ — использованием МШУ с высоким коэффициентом усиления и низкой шумовой температурой $T_{\text{ш}}$.

На рис. 4.6 приведены ориентировочные шумовые характеристики некоторых типов МШУ, которыми можно воспользоваться при расчете энергетики трассы связи. Наиболее рациональным решением является выбор типа МШУ, шумовая температура которого близка к шумовой температуре антенны.

Малозумящие усилители-преобразователи частоты (МШУ-Пр), входящие в тракт трансляции, предназначены для приема и преобразования двух ортогональных по поляризации сигналов систем спутниковой связи в диапазонах частот С и Ku и обладают основными техническими данными, приведенными в табл. 4.1.

Как следует из табл. 4.1, малозумящие усилители-преобразователи отечественного производства обладают малой шумовой температурой, малой спектральной плотностью шумов и высоким коэффици-

Таблица 4.1

Характеристика	МШУ-Пр диапазона частот		
	F1	F2	F3.2
Диапазон рабочих частот на входе, ГГц	3,4...4,2	10,95...11,7	12,25...12,75
Диапазон рабочих частот на выходе, ГГц	0,95...1,75	0,95...1,7	0,95...1,5
Коэффициент усиления, дБ, не менее	60	60	60
Неравномерность АЧХ, дБ, во всей полосе рабочих частот, не более:			
в полосе 80 МГц	2	2	2
на любом участке диапазона рабочих частот, не более	0,5	0,5	0,5
Эквивалентная шумовая температура входа в нормальных климатических условиях, К, не более	25	80	80
$K_{стU_{входа}}$, не более	1,25	1,25	1,25
$K_{стU_{выхода}}$, не более	1,5	1,5	1,5
Допустимый уровень сигнала на входе МШУ-Пр, мВт	1	1	1
Относительная нестабильность частоты гетеродина в интервале рабочих температур, не более	$\pm 3 \cdot 10^{-8}$	$\pm 3 \cdot 10^{-8}$	$\pm 3 \cdot 10^{-8}$
Уровень спектральной плотности мощности фазовых шумов в спектре сигнала гетеродина, дБ/Гц, не более, при отстройке от несущей частоты:			
на 10 Гц	-30	-30	-30
на 100 Гц	-60	-60	-60
на 1 кГц	-70	-100	-70
на 10 кГц	-80	-103	-80
Ослабление сигналов по зеркальному каналу приема, дБ, не менее	50	50	50
Вход МШУ-Пр волноводный сечением, мм	58×25	19×9,5	19×9,5
Выход МШУ-Пр коаксиальный	тип F	тип F	тип F

ентом усиления и по основным параметрам не уступают зарубежным образцам.

Основными исходными данными для проведения расчета ЭМД к ССС являются:

- 1) географические координаты ЗС и подспутниковой точки ИСЗ;
- 2) характеристика излучения бортового ретранслятора спутника:
 - а) зоны освещенности обслуживаемой территории;
 - б) эффективная изотропная излучаемая мощность в направлении приемной земной станции (по заявочной характеристике) бортовой антенны;
- 3) шумовая добротность приемной системы ЗС;
- 4) технические характеристики приемной системы (до демодулятора).

По этим исходным данным определяются:

Теорема синусов сферического треугольника

$$\frac{\sin \alpha}{\sin A} = \frac{\sin \beta}{\sin B} = \frac{\sin \gamma}{\sin C};$$

$$A = 90^\circ - \theta_2; \quad C = 90^\circ - \theta_1; \quad \beta = \varphi_2 - \varphi_1,$$

где φ_1, φ_2 — географические координаты долготы проекции подспутниковой точки и земной станции соответственно; θ_1, θ_2 — географические координаты широты подспутниковой точки спутника и земной станции соответственно.

При определении координат долготы и широты следует учитывать знак, принимая северную широту и восточную долготу положительной, а южную широту и западную долготу отрицательной. Расстояние, км, от земной станции до проекции спутника (отрезок ac на рис. 4.7) определяется по формуле

$$d = 111B = 111\beta',$$

так как один дуговой градус сферических координат на поверхности Земли соответствует 111 км на ее поверхности.

Из треугольника ONM (рис. 4.8) следует

$$(\varepsilon + 90) + \beta' + \gamma' = 180, \quad \text{или} \quad \varepsilon + \beta' + \gamma' = 90,$$

где γ' — угол между направлениями от спутника на подспутниковую точку и на ЗС.

Согласно теореме синусов для плоского треугольника

$$\frac{D}{\sin \beta'} = \frac{R_3}{\sin \gamma'} = \frac{r}{\sin(90 + \varepsilon)} = \frac{r}{\cos \varepsilon}. \quad (4.2)$$

С учетом теоремы косинусов для плоского треугольника:

$$D = \sqrt{r^2 + R_3^2 - 2R_3r \cos \beta'},$$

где R_3 — радиус Земли; r — радиус орбиты ИСЗ (радиус Земли плюс высота спутника); D — наклонная дальность — расстояние от земной станции до спутника; ε — угол места антенны ЗС при наведении ее на спутник.

Для удобства вычислений при определении азимута рассчитывается дополнительный угол C' , который для геостационарных спутников всегда меньше 90° . Итак,

$$\cos B = \cos A \cos C + \sin A \sin C \cos \beta;$$

$$B = \arccos(\cos A \cos C + \sin A \sin C \cos \beta);$$

$$\sin C' = \frac{\sin C \sin \beta}{\sin B}, \quad C' = \arcsin \frac{\sin C \sin \beta}{\sin B}.$$

По топографическому определению азимутом называется угол между направлением на север и направлением на подспутниковую точку. Таким образом, истинный азимут станции наблюдения определяется как $A_3 = 180 + C'$, если подспутниковая точка находится южнее и западнее станции или как $A_3 = 180 - C'$, если южнее и восточнее. Целесообразно определить также и угол γ' , чтобы с учетом направленности бортовой антенны установить, находится ли земная станция в пределах ее диаграммы направленности:

$$\gamma' = 90^\circ - \varepsilon - \beta'; \quad \frac{D}{\sin \beta'} = \frac{r}{\cos \varepsilon}.$$

С учетом (4.2) угол места антенны ЗС

$$\varepsilon = \arccos \left(\cos r \sin \frac{\beta'}{D} \right).$$

В существующей технической литературе встречается также табличный способ расчета, где величины D , ε , d и γ' для геостационарных спутников можно определить из номограмм, рассчитанных по приведенным ниже формулам.

Угол места α и азимут β каждого из направлений на ИСЗ, расположенного на геостационарной орбите, определяется соответственно выражениями:

$$\alpha = \arctg \frac{\cos(\varphi_{\text{ТН}} - \varphi_{\text{СП}}) \cos \theta_{\text{ТН}} - 0,15}{\sqrt{1 - [\cos(\varphi_{\text{ТН}} - \varphi_{\text{СП}}) \cos \theta_{\text{ТН}}]^2}};$$

$$\beta = \arcsin \left\{ \frac{\sin(\varphi_{\text{ТН}} - \varphi_{\text{СП}})}{\sqrt{1 - [\cos(\varphi_{\text{ТН}} - \varphi_{\text{СП}}) \cos \theta_{\text{ТН}}]^2}} \right\}.$$

Здесь $\varphi_{\text{ТН}}$, $\varphi_{\text{СП}}$ — долготы пункта размещения антенны земной станции и подспутниковой точки соответственно; $\theta_{\text{ТН}}$ — широта пункта размещения земной станции.

В рассматриваемом случае азимут отсчитывается от направления на юг по часовой стрелке. Для конкретизации требований к системам наведения обычно задаются координатами подспутниковых точек и координатами земной станции [11].

4.5. Особенности энергетики спутниковых линий связи

Линии спутниковой связи без ретрансляции через вспомогательный спутник состоят из двух участков: Земля — спутник и спутник — Земля. В энергетическом смысле оба участка оказываются напряженными, первый — из-за стремления к уменьшению мощности передат-

чиков и упрощению земных станций (в особенности в системах с большим числом малых приемопередающих земных станций, работающих в необслуживаемом режиме), второй — из-за ограничений на массу, габаритные размеры и энергопотребление бортового ретранслятора.

Особенностью спутниковых линий связи является наличие больших потерь сигнала, обусловленных затуханием его энергии на трассах большой физической протяженности. Так, при высоте орбиты ИСЗ 36 тыс. км затухание сигнала на трассе может достигать 200 дБ, что соответствует ослаблению сигнала в 10^{20} раз. Помимо этого основного пространственного затухания сигнал на линиях спутниковой связи подвержен влиянию большого числа других факторов, отмеченных ранее, таких, как поглощение в атмосфере, вращение плоскости поляризации, вызванное эффектом Фарадея, рефракция, деполяризация. На приемное устройство спутника и земной станции, кроме собственных аппаратурных шумов, воздействуют разного рода помехи в виде теплового излучения земной поверхности, атмосферы, излучений Космоса, Солнца и планет. В этих условиях правильный и точный учет влияния всех факторов позволяет осуществить оптимальное проектирование системы, обеспечить ее надежную работу и в то же время исключить излишние энергетические запасы, приводящие к неоправданному увеличению сложности земной и бортовой аппаратуры. Точный учет воздействия на приемную антенну ЗС тепловых шумов окружающего антенну пространства является сложной научной проблемой, подходы к решению которой будут представлены в последующих разделах.

Нормы на некоторые показатели качества спутниковых каналов (в том числе на отношение сигнал-шум) имеют статистический характер. Это заставляет проводить количественную оценку возмущающих факторов также статистическими методами и вводить при расчетах не только количественную меру воздействия соответствующего фактора, но и вероятность его появления.

Необходимо учитывать характер и число передаваемых сигналов, а также особенности их преобразования в спутниковом ретрансляторе. Следует иметь в виду, что при передаче программ телевидения бортовой ретранслятор работает в односигнальном режиме, типичном для наземных радиорелейных линий, и лишь усиливает ретранслируемый сигнал. При передаче телефонных каналов в системах с многостанционным доступом через бортовой ретранслятор проходит одновременно несколько сигналов, разделенных по частоте, времени или форме, оказывающих взаимное влияние, которое также должно учитываться при расчете энергетики спутниковых линий. В зависимости от класса сис-

темы на борту может применяться тот или иной вид обработки сигнала, в том числе и его полная регенерация, уменьшающая накопление шумов и искажений, возникающих на различных участках трассы.

Вопросы к главе 4

1. Что такое электромагнитная доступность источников излучения?
2. Какие энергетические параметры КА влияют на его ЭМД?
3. Какие энергетические параметры ЗС влияют на ЭМД?
4. Каким образом частота рабочего диапазона влияет на затухание сигнала в свободном пространстве?
5. От каких факторов зависят дополнительные потери на трассе распространения?
6. Что такое шумовая добротность приемной системы ЗС и от каких параметров она зависит?
7. Какие виды шумов необходимо учитывать при расчете шумовой добротности?
8. Какие типы МШУ используются в спутниковой связи?
9. Какие факторы определяют шумовую температуру антенны?
10. Чем вызвана деполяризация сигнала на трассе ССС?

5 Методы многостанционного доступа и предоставления каналов

5.1. Виды многостанционного доступа

При одновременной работе многих земных станций через один КА-ретранслятор в некоторой общей полосе частот, например в общей полосе частот одного ствола ретранслятора, на входе приемной антенны ретранслятора образуется групповой сигнал от излучений нескольких земных станций. Этот групповой сигнал усиливается ретранслятором, переносится на другую частоту — частоту передачи, еще раз усиливается в передающем тракте ретранслятора и излучается бортовой антенной в сторону земных станций, где каждая из них должна принять предназначенный ей сигнал без помех от других работающих станций. Этот процесс уплотнения в эфире сигналов от многих станций и последующее их разделение на Земле называется многостанционным доступом.

Многостанционный доступ является характеристикой пространственно-распределенной радиосистемы, в отличие от многоканальной линии связи, где множество источников сигналов физически присутствуют на входе многоканальной линии связи и вследствие этого отсутствуют проблемы синхронизации источников сигналов отдельных каналов [12].

Многостанционный доступ с разделением сигналов отдельных станций в некоторой общей полосе частот может быть организован:

- разделением сигналов по частоте (МДЧР);
- разделением сигналов по времени (МДВР);
- кодовым разделением сигналов (МДКР).

5.2. Многостанционный доступ с частотным разделением

Многочастотный доступ с частотным разделением (МДЧР, Frequency Division Multiple Access, FDMA) является наиболее простым и распространенным способом выделения сигналов, предназначенных

данной ЗС как в аналоговых, так и цифровых ССС. При МДЧР каждая ЗС передает свои сигналы в отведенном ей участке полосы пропускания ретранслятора. Основной недостаток такого способа разделения — уменьшение пропускной способности по сравнению с односигнальным режимом, вызванное необходимостью уменьшения на 4...6 дБ мощности выходного усилителя-ретранслятора из-за появления интермодуляционных помех. Кроме того, в этом случае необходима высокая стабильность частоты и мощности сигнала, излучаемого каждой ЗС. В системах с МДЧР передача может осуществляться как многоканальными сигналами, так и одноканальными с использованием принципа передачи «один канал на несущую» (ОКН). Метод ОКН применяют в основном в сети станций с небольшим числом каналов. Основное преимущество метода состоит в возможности реализации принципа предоставления каналов по требованию (ПКТ). Метод МДЧР широко используется в ССС «Интерспутник», Inmarsat, Interlsat и национальных ССС многих стран.

5.3. Многостанционный доступ с временным разделением сигналов

При способе разделения сигналов МДВР (Time Division Multiple Access, TDMA) в стволе ретранслятора организуется ретрансляция сигналов наземных станций по очереди. За земной станцией закрепляется на все время работы или на некоторый сеанс связи временное окно в некотором общем кадре и положение этого окна во времени повторяется в каждом из кадров.

В своем временном отрезке (окне) земная станция передает пакет двоичных символов, состоящий из преамбулы и пакета данных. Преамбула содержит биты синхронизации приемника по несущей частоте (отрезок несущей частоты), по тактовой частоте символов (меандр), адресную информацию и символы сигнализации (рис. 5.1). Одна из станций сети связи является ведущей и излучает кадровый сигнал синхронизации, который принимается всеми станциями сети и служит для синхронизации всех земных станций.

Достоинством метода МДВР по отношению к МДЧР является отсутствие перекрестных помех в ретрансляторе, поскольку в любой

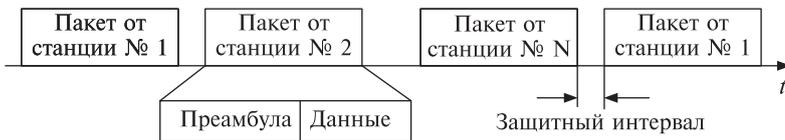


Рис. 5.1. Передача пакетов при МДВР

момент времени усилитель мощности ретранслятора КА усиливает сигнал только от одной станции и вследствие этого усилитель мощности может работать все время в режиме, близком к режиму насыщения. Так как в радиолинии с целью минимизации помех между соседними частотными стволами используются сигналы со спектром Найквиста, то усилитель мощности не должен искажать форму импульсов сигнала. В противном случае в режиме насыщения усилителя мощности радиоимпульсы примут прямоугольную форму со спектром типа $(\sin x)/x$, что создаст сильные помехи соседним стволам. Поэтому при МДВР усилитель мощности ретранслятора КА должен также работать в квазилинейном режиме. Ввиду небольшого пик-фактора сигналов Найквиста усилитель мощности ретранслятора должен иметь смещение рабочей точки P_c/P_0 от -1 до $-1,5$ дБ.

По сравнению с МДЧР спутниковые системы с МДВР имеют два недостатка:

- при требуемой одинаковой средней излучаемой мощности земных станций и диаграмме направленности антенны ретранслятора пиковая мощность излучения земной станции при МДВР должна быть в $n \gg 1$ раз больше, чем при МДЧР, где n — число каналов (временных окон) в системе. Это усложняет и удорожает наземную станцию;
- возможности адаптации отдельных радиолиний по энергетике ограничены и могут быть реализованы только за счет изменения скорости передачи информации и скорости кодирования, что нежелательно.

Энергетические возможности системы связи с МДВР могут быть многократно увеличены, если перейти от широкого луча антенны ретранслятора, покрывающего всю зону обслуживания КА, к прыгающему узкому приемо-передающему лучу ретранслятора. Этот луч направляется на земную станцию в момент прихода на ретранслятор пакета информации, предназначенной для нее, и перенаправляется на другую земную станцию сразу же после окончания передачи пакета. Концепция построения такой системы с МДВР иллюстрируется рис. 5.2.

Энергетический выигрыш в радиолиниях в дБ в этом случае будет равен раз-

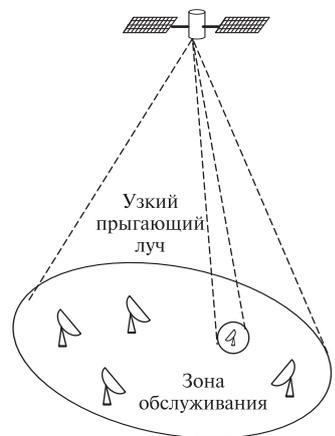


Рис. 5.2. Концепция узкого индивидуального прыгающего луча при МДВР

нице в коэффициентах усиления антенны ретранслятора с узким лучом и антенны с лучом, покрывающим одновременно всю зону обслуживания. Этот выигрыш в энергетике радиолиний может быть большим и используется для уменьшения излучаемой ретранслятором мощности сигналов, уменьшения диаметров антенн земных станций, уменьшения мощностей излучения этих станций и др.

Высокие энергетические характеристики спутниковой системы связи с адаптацией к условиям распространения радиосигналов может обеспечить комбинированный метод многостанционного доступа МДЧР-МДВР, при котором в каждом стволе организуется одновременная работа, например, восьми-шестнадцати несущих частот (МДЧР) и на каждой несущей частоте организуется режим МДВР со сверхузкими «прыгающими» лучами.

5.4. Многостанционный доступ с кодовым разделением сигналов

Кодовое разделение (МДКР, Code Division Multiple Access, CDMA) использует отличительный признак формы передаваемого сигнала. Технология CDMA предполагает возможность одновременной работы группы разнообразных радиосредств (мобильные терминалы, отдельные радиостанции, земные станции спутниковой связи и т. д.) пользователей в общей полосе частот ΔF . Сигналы радиосредств $S_i(t)$ образуют суммарный (групповой) сигнал $S_\Sigma(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t)$, который воздействует на все приемные устройства пользователей. Взаимная ортогональность сигналов $S_i(t)$ обеспечивает корреляционному приемнику выделение «интересующего» его сигнала $S_i(t)$ из $S_\Sigma(t)$.

Система CDMA реализуется только в цифровом виде. Формирование достаточного множества сигналов $\{S_i(t)\}$, удовлетворяющего условию ортогональности, представляет одну из проблем CDMA. Эта проблема решается на основе сложных шумоподобных сигналов (ШПС) цифрового вида, что характеризует систему CDMA как систему с расширенным спектром. Широкополосность такой системы обеспечивает малый уровень излучаемой мощности радиосредств, а также возможность работы в многолучевом канале. В принципе для формирования CDMA-сигналов применимы все методы расширения спектра. В практическом плане для мобильной связи предпочтителен метод прямого расширения спектра (DS-CDMA) на основе ортогональных ПСП и метод скачкообразного изменения частоты (FH-CDMA).

Оценка эффективности МДКР. Предполагается, что в зоне обслуживания КА радиосигналы от каждой наземной станции в ст-

воле ретранслятора занимают всю полосу частот ствола и отличаются только формой псевдошумового сигнала. В приемнике наземной станции сигнал нужной станции выделяется с помощью коррелятора, опорный сигнал которого имеет форму, присвоенную сигналам принимаемого абонента.

Если в системе с МДКР используются асинхронные сигналы, при которых временные сдвиги между сигналами от разных наземных станций являются неуправляемыми и могут быть любыми, то при приеме сигнала одной наземной станции сигналы других наземных станций являются помехой, которая называется шумами неортогональности, или внутрисистемной помехой [13].

При полосе частот псевдошумового сигнала Δf , т. е. полосе частот радиосигнала в эфире, длительности информационного символа τ_0 и длительности одного символа псевдошумового сигнала τ , так что $\tau \approx 1/\Delta f$, база радиосигнала $B = \tau_0/\tau \approx \tau_0\Delta f$.

Для минимизации внутрисистемных помех спектральные плотности сигналов на выходе ретранслятора от всех земных станций должны поддерживаться одинаковыми. Если на выходе приемной антенны земной станции сигнал от ретранслятора имеет равномерный спектр со спектральной плотностью $P_c/\Delta f$, где P_c — мощность сигнала на выходе приемной антенны от одной станции, отношение энергии бита к спектральной плотности помех на выходе приемной антенны наземной станции

$$\frac{E_b}{N_{0\Sigma}} = \frac{E_b}{N_0 + N_s} = \frac{P_c\tau_0}{N_0 + N_s},$$

где N_0 — спектральная плотность шумов; N_s — спектральная плотность внутрисистемных помех.

При условии, что все земные станции сети связи являются одинаковыми, при рассмотрении излучения земных станций как шума в полосе Δf можно получить

$$N_s = \frac{(n-1)P_c}{\Delta f},$$

где n — число одновременно работающих станций в стволе ретранслятора. Тогда

$$h^2 = \frac{E_b}{N_{0\Sigma}} = \frac{P_0\tau_0}{N_0 + (n-1)P_c/\Delta f}$$

где h^2 — отношение энергии бита к спектральной плотности помех на выходе приемной антенны наземной станции.

Это выражение не накладывает каких-либо ограничений на методы модуляции и кодирования сигналов. При увеличении мощности сигнала, так что $N_0 \ll N_\Sigma$,

$$h^2 = \frac{\tau_0 \Delta f}{n-1} \approx \frac{B}{n}, \quad n \ll 1.$$

Отсюда максимальное число каналов в полосе Δf равно $n = B/h^2$. При стандартной величине $h^2 = 4 \dots 6$ дБ (для помехоустойчивого кодирования со скоростью кодирования $R_k = 1/2$) можно получить $n = B/4$.

Для систем с МДЧР число каналов связи в полосе Δf определяется как $N = \Delta f / \Delta f_k$, где Δf_k — полоса частот одного канала. Можно считать, что

$$\Delta f_k \approx \frac{1}{2\tau_0 r_k}$$

для четырехфазной модуляции сигналов. При $r_k = 1/2$ имеет место $n \approx \Delta f \tau_0 = B$.

Таким образом, при МДКР число организации возможных каналов связи в четыре раза меньше по сравнению с системой с МДЧР и МДВР.

Требуемая величина h^2 для МДКР больше требуемой величины $h^2 = P_c \tau_0 / N_0$ для МДЧР или МДВР. Проигрыш в энергетике по сравнению с МДЧР или МДВР будет мал, когда

$$\frac{P_c \tau_0}{N_0} \frac{n}{B} \ll 1, \quad \text{т. е. при } \frac{B}{n} \gg \frac{P_c \tau_0}{N_0}$$

или когда число каналов МДКР достаточно мало.

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что в спутниковой системе связи с одним лучом бортовой антенны, охватывающим всю зону обслуживания, асинхронный МДКР проигрывает МДЧР и МДВР как по энергетике радиолиний (за счет возникновения внутрисистемных помех), так и по пропускной способности (по числу каналов в той же полосе частот).

Достоинством системы с МДКР является возможность создания системы связи с большим числом закрепленных каналов связи, когда каждой земной станции присваивается своя форма псевдошумового сигнала. Число квазиортогональных форм, или величина ансамбля квазиортогональных сигналов $N \gg B$. Это позволяет любой земной станции спутниковой связи выйти в эфир без сложной процедуры предоставления канала связи по требованию, что важно при организации

пакетных каналов связи при пульсирующем трафике с передачей коротких пакетов данных.

Характеристики системы связи с МДКР существенно улучшаются при организации в стволе ретранслятора радиально-узловой сети связи (типа «звезда»), когда земные терминалы связываются только с базовой станцией. В этом случае при передаче информации от базовой станции может использоваться синхронный режим МДКР с ортогональными псевдошумовыми сигналами, который по эффективности использования спектра частот и помехоустойчивости эквивалентен МДЧР или МДВР. В обратном направлении от терминалов в сторону базовой станции должна использоваться асинхронная передача сигналов с МДКР, что снижает пропускную способность этого направления. Однако это не является серьезным недостатком при мультимедийном трафике, передаваемом по этим сетям, который асимметричен по своей природе.

Таким образом, МДКР является единственным многостанционным доступом, который позволяет создавать разнообразные эффективные спутниковые пакетные сети связи при пульсирующем трафике и сети связи с большим числом закрепленных каналов.

5.5. Метод сдвоенной несущей

Метод сдвоенной несущей (Carrier-in-Carrier) при организации многостанционного доступа PCMA (Paired Carrier Multiple Access) является одним из перспективных направлений развития сетей спутниковой связи. Пояснение особенностей действия данного метода представлена на рис. 5.3. Результатом его применения является использование одной и той же полосы ретранслятора для передачи сигналов прямого и обратного направлений. Метод PCMA может использоваться в сочетании с другими методами МСД: PCMA-FDMA, PCMA-TDMA, PCMA-CDMA.

Стоимость аренды ресурса оператора спутника связи является самой существенной статьей затрат использовании сетей и линий спутниковой связи, так как эти затраты являются периодическими, а не капитальными. В общем случае стоимость эксплуатации спутникового сегмента зависит как от полосы частот, занимаемой информационным сообщением, так и от энергетической части ресурса, отбираемого у транспондера. Использование решетчатого кодирования в сочетании с кодами Рида–Соломона для модуляции 8PSK, а также турбокодирование и кодирование LDPC позволили существенным образом улучшить эффективность спутниковых линий связи за счет улучшения энергетических параметров. Однако наиболее важное значение имеет

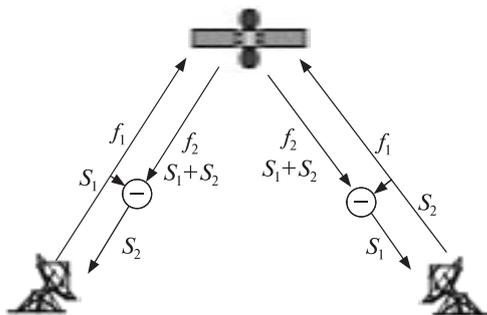


Рис. 5.3. Особенности построения системы PCMA

техническая реализация полнодуплексной работы спутниковых линий связи с использованием одной и той же полосы частот транспондера в режиме приема и передачи. Компания Comtech EF Data в содружестве с Applied Signal Technology, Inc. реализовала способ оптимизации использования частотного ресурса, условно названный Carrier-in-Carrier. В данном случае применяется запатентованный метод адаптивной компенсации, который позволяет осуществить одновременную работу двух станций с использованием одной и той же полосы частот, что позволяет экономить 50 % частотного ресурса. Применение подобного метода может привести к небольшому (порядка 0,5 дБ) понижению отношения сигнал/шум (или E_b/N_0), однако это может быть компенсировано использованием более прогрессивных методов модуляции и кодирования.

Процесс компенсации в этом случае представляет собой комбинированный способ обработки сигнала, заключающийся в определении времени задержки сигнала и смещения частоты, адаптивной фильтрации и когерентного сложения (рис. 5.4). При дуплексной работе линии связи для каждого направления характерен свой вид сигнала передачи данных, так чтобы на каждой стороне он мог бы быть определен и выделен из суммарного сигнала путем сравнения с передаваемым сигналом и вычтен из него перед детектированием сигнала удаленного конца.

Алгоритм определения общего времени задержки заключается в сравнении принимаемого сигнала с копией сигнала на передачу — изменяется время задержки и смещение частоты копии сигнала на передачу с последующим сравнением ее с сигналом приемного тракта ПЧ. Метод PCMA в сочетании с CDMA способствует защите данных пользователя, так как создает значительные трудности для несанкционированного доступа.

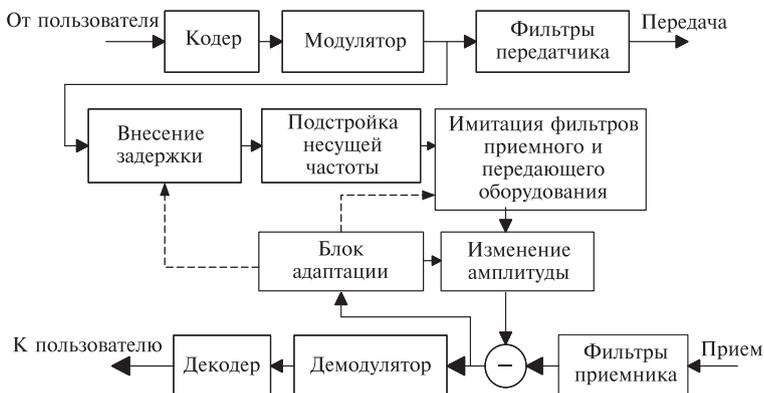


Рис. 5.4. Структура спутникового модема с CSMA

5.6. Методы предоставления каналов в сетях спутниковой связи

Современные системы спутниковой связи все чаще представляют собой не отдельные наземные станции, связанные между собой радиоканалами с ретрансляцией через спутник, а сети, состоящие из множества наземных станций с единой системой управления, обеспечивающей, кроме всего прочего, эффективное и экономичное использование ресурсов ретранслятора. Для связи с подвижными объектами служат сети мобильной спутниковой связи, множество фиксированных станций с малыми размерами антенн организуют сети VSAT. В тех и других сетях очень важно подобрать оптимальный режим использования пропускной способности спутника ретранслятора

Существуют следующие три метода предоставления каналов связи пользователям сети:

- многостанционный доступ с фиксированным закреплением каналов;
- произвольный доступ;
- многостанционный доступ с предоставлением каналов по требованию (МДПКТ).

При выборе метода предоставления каналов в спутниковых системах связи необходимо учитывать следующие факторы:

- статистические характеристики трафика;
- допустимую временную задержку при передаче, включая время установления канала;
- эффективность совместного использования каналов или величина пропускной способности;
- затраты на оборудование и его реализацию;

- особенности эксплуатации и технического обслуживания.

В случае интерактивной передачи данных типа запрос/ответ наиболее важным требованием для пользователя может быть сокращение времени ответа. В этом случае трафик невелик и состоит из коротких пакетов, поэтому эффективность использования пропускной способности спутникового канала может быть менее важной. В случае передачи пакетов данных, такой как передача файлов, эффективность использования пропускной способности канала более важна по сравнению с требованием краткого времени ответа, поскольку объемы передаваемых данных здесь, как правило, увеличиваются.

5.6.1. Многостанционный доступ с фиксированным закреплением каналов

Когда трафик от наземной станции велик и относительно постоянен во времени, как в случае передачи данных в режиме уплотнения или телефонного обмена, может оказаться более рациональным закрепление канала связи с фиксированной емкостью за конкретной станцией. Это может быть осуществлено предоставлением всей емкости несущей станции (МДВР/ОКН) либо периодическим предоставлением нескольких отдельных временных интервалов относительно небольшой фиксированной длительности в системе МДВР. Примером первого случая является сеть для связи одной ЗС с другой, когда пара выделенных спутниковых каналов закрепляется на постоянной основе за парой наземных станций, которые связываются только между собой.

Однако использование метода многостанционного доступа с фиксированным закреплением каналов неэффективно при небольшом объеме трафика в виде пакетов в направлении к отдельной станции и от нее. Это же можно сказать при достаточно большом, но не очень частом трафике (что типично для пакетов данных или телефонной связи), поскольку в таких случаях спутниковый канал может быть свободен большую часть времени.

При таком режиме эксплуатации нет необходимости в процедуре предоставления канала в реальном масштабе времени. В сети не требуется контроллер сети и сложный протокол предоставления каналов или соответствующее оборудование.

5.6.2. Произвольный доступ

Этот метод часто используется для входящих передач в сетях VSAT звездообразной архитектуры. Он особенно пригоден, когда объем трафика от станций VSAT невелик и передача осуществляется в

виде пакетов. При этом методе входящий спутниковый канал используется совместно несколькими станциями VSAT. Когда у станции VSAT имеются данные для передачи, она передаст их в виде короткого пакета, не зная о том, ведется ли одновременная передача по этому каналу другими станциями VSAT. Когда объем трафика невелик, большинство передач успешны, хотя некоторые передачи налагаются на передачи от других станций и не могут быть приняты абонентом. Если передача оказывается безуспешной, станция VSAT осуществляет повторные попытки передачи после некоторого произвольного интервала времени и повторяет их до тех пор, пока не получит подтверждения приема от центральной станции.

С увеличением объема трафика вероятность безуспешных передач из-за взаимных коллизий возрастает и, в конце концов, когда объем предполагаемого к передаче трафика превысит предельную величину, система может «сломаться» или стать нестабильной, так что большинство передач не будут поступать к абонентам. Поэтому в действующих системах должен быть введен какой-то механизм управления потоком сообщений для предотвращения возникновения подобной ситуации. Можно показать, что пропускная способность, т. е. отношение между фактически переданным графиком и полной емкостью несущей МДВР, характеризуется относительно небольшой величиной.

Для увеличения пропускной способности в таких ситуациях разработаны варианты метода АЛОХА. Существуют два основных метода (схемы) АЛОХА: чистый метод АЛОХА и АЛОХА с временными интервалами. Так, АЛОХА с избирательным отказом является вариантом чистого метода АЛОХА. Другим вариантом является использование резервирования временных интервалов в методе АЛОХА с временными интервалами.

Чистый метод АЛОХА. При использовании этого метода для увеличения пропускной способности каждая станция VSAT передает пакет, как только возникает необходимость в установлении связи. Время начала передачи пакета случайно. Если пакет принимается центральной станцией без искажений, она посылает подтверждение по исходящему каналу. В этом протоколе иногда возможна взаимная коллизия нескольких пакетов в спутниковом ретрансляторе. Когда это коллизия происходит, центральная станция подтверждения не посылает. Если станция VSAT не получает подтверждения после передачи пакета, она предполагает, что передача оказалась безуспешной и осуществляет повторную передачу того же пакета. Во избежание повторного возникновения коллизий каждая станция VSAT производит повторную передачу после псевдослучайного интервала времени. Пе-

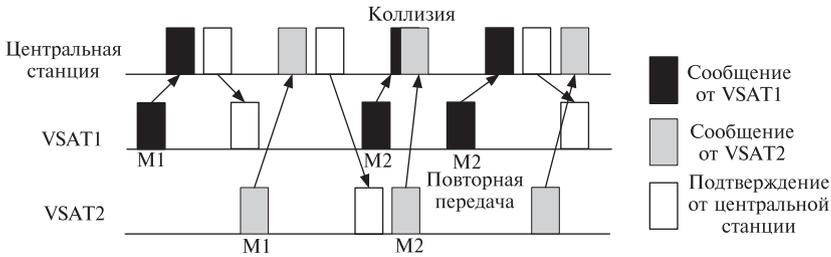


Рис. 5.5. Передача пакетов с использованием чистого метода АЛОХА

редача бывает безуспешной, даже если произойдет только частичная коллизия пакетов.

Достоинством чистого метода АЛОХА является простота необходимого оборудования. Поскольку временная синхронизация между станциями VSAT в сети не требуется, центральной станции и станциям VSAT не нужен точный контроль синхронизации. Недостатком такого способа организации связи является низкая пропускная способность сети.

Метод АЛОХА с временными интервалами известен также как МДВП с произвольным доступом. При использовании этого метода необходима временная синхронизация между станциями VSAT в сети. Пакеты могут передаваться только в пределах каждого временного интервала. На рис. 5.6 показана последовательность повторной передачи протокола при использовании метода АЛОХА с временными интервалами, т. е. при возникновении коллизий пакетов в пределах одного временного интервала и повторной передаче сообщений после временной задержки с произвольной длительностью.

Если длина информационного пакета трафика составляет в среднем половину длительности временного интервала, реальная пропускная способность будет такой же, как при использовании чистого метода АЛОХА.

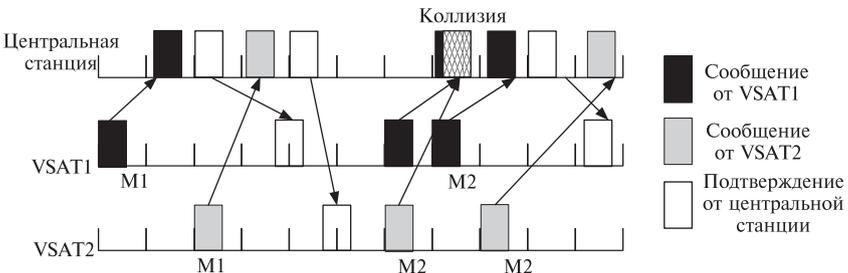


Рис. 5.6. Передача пакетов (метод АЛОХА с временными интервалами)

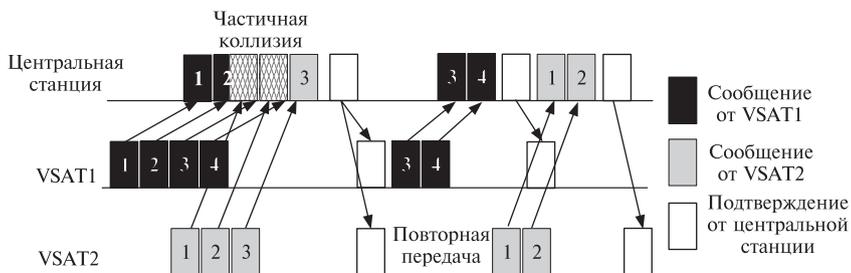


Рис. 5.7. Передача пакетов с использованием метода АЛОХА с избирательным отказом

Метод АЛОХА с избирательным отказом основан на том, что сообщения в пакете формируются в последовательность субпакетов (рис. 5.7). Эти субпакеты имеют фиксированную длину и могут приниматься независимо. Каждый из субпакетов должен иметь собственный заголовок и синхронизирующую преамбулу. В этом случае может наблюдаться частичная коллизия сообщений на уровне субпакетов, когда некоторые из них разрушаются. В методе АЛОХА с избирательным отказом повторно передаются только поврежденные субпакеты. Такой метод не требует временной синхронизации сообщений или субпакетов и позволяет реализовать более высокую пропускную способность по сравнению с чистым методом АЛОХА.

Метод АЛОХА с избирательным отказом вполне подходит и для передачи сообщений с переменной длиной.

АЛОХА с резервированием. Когда пакеты данных, предназначенных для передачи, поступают на станцию VSAT, она направляет запрос на центральную станцию, которая посылает ответ с указанием выделенных временных интервалов (окон) в системе МДВР. Запрос содержит информацию о длине и количестве пакетов данных, которые должны будут передаваться. По получении информации о выделении требуемых интервалов времени станция VSAT передает заявленные пакеты данных в выделенных интервалах времени без какого-либо риска возникновения коллизий. В этом случае центральная станция сообщает всем другим задействованным станциям VSAT об этих зарезервированных интервалах времени. Хотя режим резервирования требует больше времени на получение ответа, поскольку в этом случае необходимо затратить время, равное времени двух прохождений сигнала через спутник, прежде чем начнется действительная передача пакетов данных, указанный режим весьма эффективен в случае более длинных сообщений. Следует отметить, что этот метод отличается от метода МДПКТ, описание которого приводится ниже, поскольку



Рис. 5.8. Передача в режиме резервирования

резервирование производится в режиме «пакет за пакетом» (или для группы пакетов), а не всего канала в целом.

Запрос на резервирование при использовании метода АЛОХА обычно производится в том же канале, в котором передаются данные пользователя, или в другом канале, выделенном для этой цепи. В любом случае необходима некоторая дополнительная емкость трафика для запросов на резервирование.

В одном из случаев применения короткие пакеты передаются с использованием метода АЛОХА с временными интервалами, а более длинные пакеты делятся на несколько более коротких субпакетов, которые соответствуют одному временному интервалу МДВР, как показано на рис. 5.8.

Первый субпакет, который содержит запрос на резервирование для последующих субпакетов, передается по методу АЛОХА с временными интервалами. После получения информации о выделенных окнах времени субпакеты передаются в зарезервированных интервалах без риска возникновения коллизий. При этом методе запросы на резервирование и данные пользователя передаются в одном и том же канале. Задержка при передаче коротких пакетов, которые чаще всего относятся к чувствительному к задержкам интерактивному обмену, невелика, поскольку они поступают на центральную станцию в большинстве случаев после всего лишь одного скачка через спутник. Более длинные пакеты, которые часто относятся к объемным пачкам данных, передаются по схеме с большой пропускной способностью с использованием зарезервированных временных интервалов.

Переход с одного режима на другой может производиться оператором системы. Однако некоторые изготовители предлагают абонентам на выбор автоматическое или динамичное переключение. При этом, например, может обеспечиваться автоматический переход с ре-

жима АЛОХА на режим резервирования в случае, когда наблюдается местный пик нагрузки.

5.6.3. Многостанционный доступ с предоставлением каналов по требованию

Для разных способов множественного доступа (FDMA, TDMA, CDMA) были разработаны технические решения, предусматривающие выделение спутникового канала по требованию с использованием всех указанных ранее способов. Представляет интерес систематизация применяемых сегодня способов предоставления каналов по требованию (Demand Assigned Multiple Access, DAMA).

Следует отметить, что такая систематизация осложняется тем, что в публикуемых технических материалах по системам VSAT часто подразумеваются идентичные технологии организации каналов связи, отличающиеся не только обозначениями и терминологией, но и трактовками особенностей применяемого способа.

SCPC/DAMA является самой ранней технологией, в основе которой лежит частотное разделение каналов. Поскольку это еще и наиболее простая и наглядная технология, то и реализующее ее оборудование обладает надежностью и экономичностью. Схема сети VSAT на основе этой технологии и условный частотный план приведены на рис. 5.9.

При такой организации связи абонентская станция, как правило, имеет один канал, частота которого назначается центральной станцией сети после запроса абонента. Одновременно центральная станция назначает частоту и для вызываемой абонентской станции. Эта процедура реализуется с использованием отдельного канала сигнализации или при помощи дежурных каналов.

В современных системах используется канал сигнализации типа TDM/TDMA (рис. 5.10) и варианты протоколов АЛОХА.

TDM/DAMA — еще одна технология, реализованная в аппаратуре компании Clarent, использующей приоритет речевого трафика с использованием протокола FrameRelay, адаптированного к применению с учетом задержек в спутниковом канале. В дальнейшем эта технология была применена и в ряде современных VSAT-сетей других компаний. Основное ее преимущество (по сравнению с SCPC/DAMA) заключается в том, что каждая абонентская станция излучает на своей частоте единый цифровой поток (TDM), доступный для приема всем станциям сети. В результате нет необходимости снижать мощность передатчика VSAT-станции, как это делается при организации многоканальности. Но при организации многосвязности такого типа не-

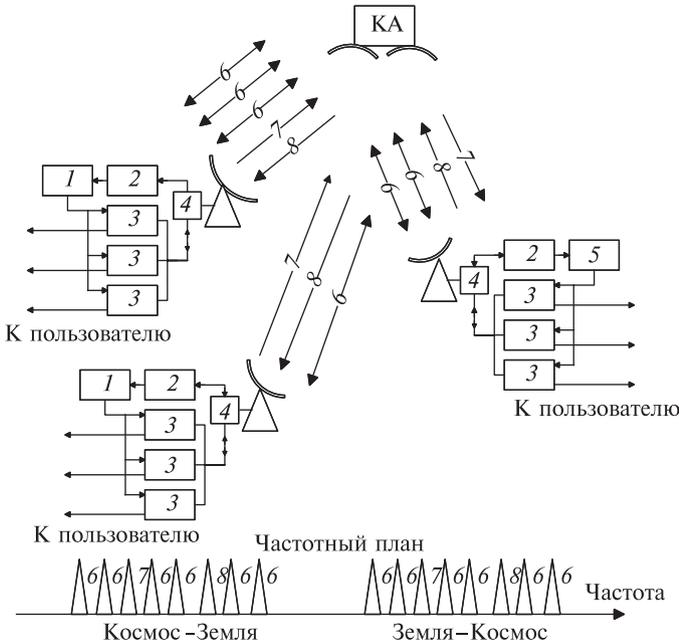


Рис. 5.9. Схема сети SCPC/DAMA: 1 — DAMA-контроллер; 2 — модем канала управления; 3 — банк модемов; 4 — РЧ; 5 — сетевое управление; 6 — информационный канал; 7 — канал запроса; 8 — канал управления

обходимо на каждой станции устанавливать столько приемных демодуляторов, сколько направлений связи предусмотрено для этой станции проектом. Соответственно, в полносвязной сети каждая VSAT-станция должна иметь $N - 1$ демодулятор, где N — число станций в сети. Схема сети с использованием TDM/DAMA и частотный план показаны на рис. 5.11. Очевидно, что такая VSAT-сеть может быть построена по топологии как Mesh (смешанной), так и Star (звезда). Следует отметить, что в сети Mesh любая станция сети для контроля и управления удаленными абонентами с дополнительным программным обеспечением может быть назначена центральной. Служебная информация в этом случае транслируется внутри информационного канала. На рис. 5.10 приведена схема формирования информационного канала TDM.

В сети Star центральная станция может формировать TDM-поток с повышенной пропускной способностью, как это происходит, например, при организации интерактивных VSAT-сетей типа DVB-RCS.

TDMA/DAMA. Одной из наиболее распространенных технологий в рассматриваемой сети является технология TDMA/DAMA, в

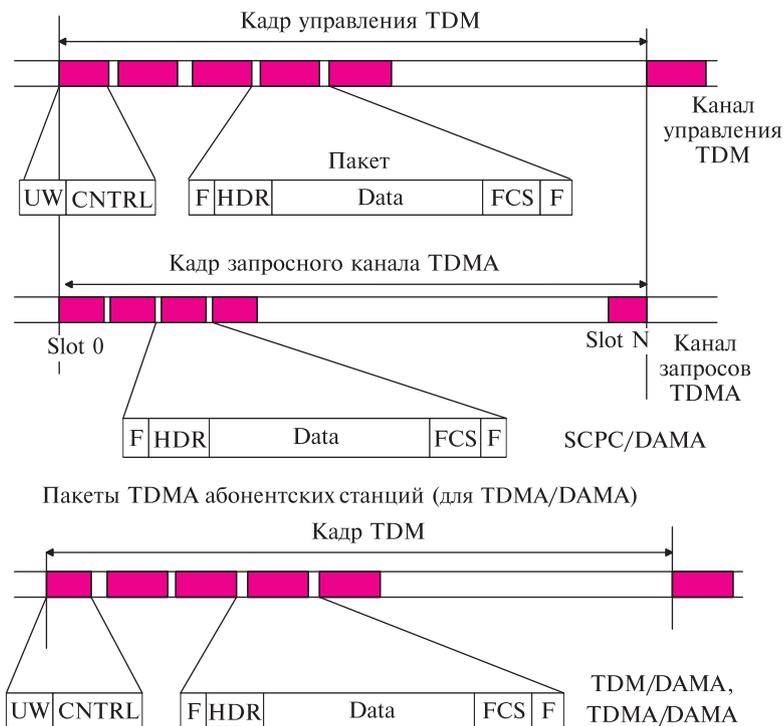


Рис. 5.10. Формирование канала сигнализации в сети SCPC/DAMA и общих каналов в сетях TDM/DAMA и TDMA/DAMA

соответствии с которой все абонентские станции сети (в простейшем случае) работают на передачу в разные интервалы времени, образуя общий поток TDMA. При этом назначенная центральная станция сети должна обеспечить жесткую синхронизацию всех временных интервалов. При реализации этой технологии обеспечивается не только работа передатчика VSAT-станции на максимальной мощности (как и в TDM/DAMA), но и принципиальная экономия частотного ресурса (по сравнению с TDM/DAMA, а тем более SCPC/DAMA).

Однако у технологии TDMA/DAMA есть и недостаток, который заключается в ограничении количества станций, которые могут активизироваться внутри одного частотного потока TDMA. Дело в том, что при увеличении скорости потока уменьшается длительность временных слотов и существенно повышаются требования к синхронизации. Для повышения пропускной способности в этом случае применяется метод «перескока» на другую частоту. В результате получается технология с дополнительным использованием частотного разделе-

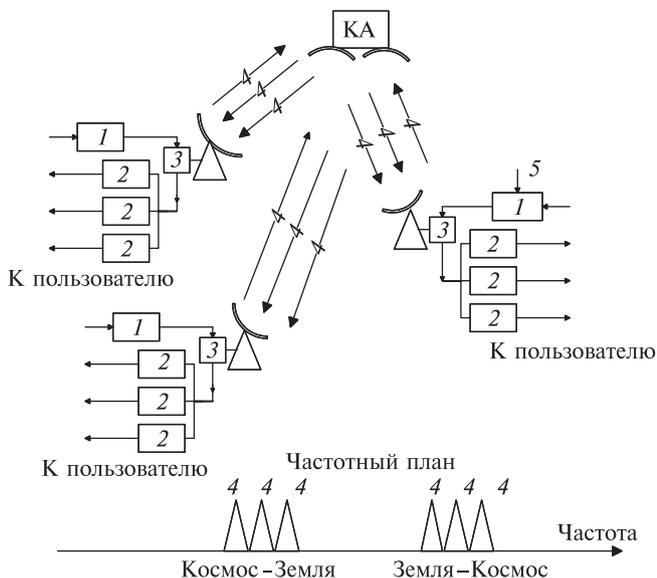


Рис. 5.11. Схема сети TDM/DAMA: 1 — модулятор TDM; 2 — банк демодуляторов; 3 — разделитель частот РЧ; 4 — каналы TDM; 5 — сигнал управления сетью

ния каналов, которая обозначается как MF-TDMA/DAMA. Следует отметить, что данная технология должна учитывать в своем программном обеспечении все различия задержек при распространении сигнала. В случае нарушения стабилизации спутника связи такая схема становится неработоспособной без дополнительного программного прогноза задержек при распространении. Формирование информационного потока TDMA и схема сети с условным частотным планом представлены на рис. 5.10 и 5.12 соответственно.

CDMA/DAMA. В основе технологии CDMA/DAMA лежит идея кодового разделения (CDMA) потоков информации, однако эта технология имеет ограниченное распространение из-за высокой стоимости оборудования. Несомненным ее достоинством является то, что спектр сигнала может быть распределен в широкой полосе частот и может даже использоваться один и тот же диапазон частот приема и передачи. Это обеспечивает не только повышенную электромагнитную совместимость с другими системами, но и дополнительную помехозащищенность канала связи.

Технологии на основе кодового разделения были разработаны для нужд военной связи и пока не получили широкого коммерческого применения.

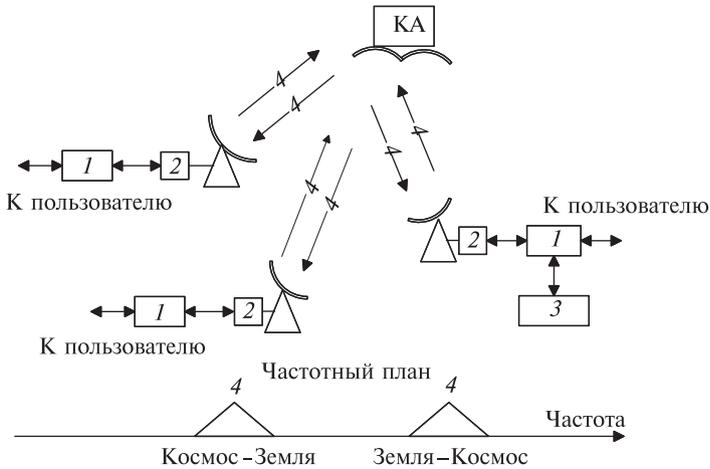


Рис. 5.12. Схема сети TDMA/DAMA: 1 — пакетный модем TDMA, 2 — РЧ, 3 — сетевое управление и синхронизация, 4 — пакетные каналы TDMA

Вопросы к главе 5

1. Объясните механизм многостанционного доступа в спутниковых системах связи.
2. Каковы особенности многостанционного доступа с частотным разделением?
3. Объясните особенности многостанционного доступа с временным разделением.
4. Каковы характерные особенности многостанционного доступа с кодовым разделением?
5. Каковы основные методы предоставления каналов?
6. Перечислите разновидности случайного доступа.

6 Виды модуляции и помехоустойчивого кодирования в спутниковых системах связи

6.1. Особенности сигналов дискретной модуляции

6.1.1. Квадратурный метод формирования сигналов амплитудно-фазовой модуляции

В современных цифровых спутниковых системах связи применяются различные виды дискретной модуляции. Наиболее широко применяются различные разновидности фазовой модуляции, хорошо работающие при низком соотношении сигнал/шум и устойчивые к нелинейным искажениям сигнала, неизбежно возникающим в ретрансляторах [6]. Для повышения спектральной эффективности сигналов, т. е. для повышения скорости передачи информации в занимаемой полосе частот, все чаще применяют многопозиционную амплитудно-фазовую модуляцию и квадратурную амплитудную модуляцию. Возможность применения этих видов модуляции обусловлена улучшением линейности ретрансляторов и повышением их энергетики. Применяется также частотная модуляция с минимальным сдвигом, отлично зарекомендовавшая себя в наземных сетях подвижной связи [14].

Для всего разнообразия видов фазовой амплитудно-фазовой и дискретной частотной модуляции имеется эффективный, повсеместно применяющийся квадратурный способ формирования модулированных сигналов.

Универсальность квадратурного представления породила все чаще встречающееся общее название IQ-модуляция, подразумевающее все виды модуляции, которые можно сформировать квадратурным методом.

Следует добавить, что в последнее время, в основном в беспроводных компьютерных сетях, все чаще стали применяться методы передачи сигналов одновременно на нескольких несущих, обладающие определенными преимуществами в условиях многолучевого распространения. В таких системах каждая из множества несущих модулируется

все той же IQ-модуляцией. Среди названий подобных систем встречаются ортогональное частотное мультиплексирование (ОЧМ), дискретная многотонная (ДМТ) модуляция, orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) [14]. Чтобы отличить при описании одночастотную систему от многочастотной, часто указывается наличие единой самостоятельно передающей всю информацию модулированной несущей добавлением аббревиатуры SC (Single Carrier — одна несущая), например QPSK SC. В спутниковых системах применение многочастотных систем не оправдано, так как они требуют большого динамического диапазона ретранслятора, малого уровня нелинейных искажений и очень чувствительны к доплеровскому сдвигу частоты.

Сигнал амплитудно-фазовой модуляции произвольного вида, в котором $A(t)$ — модулируемая амплитуда, $\Theta(t)$ — модулируемая фаза, может быть представлен в виде составляющих $X(t)$ и $Y(t)$ отдельно модулирующих по амплитуде колебание несущей частоты и сдвинутое на 90° колебание несущей частоты:

$$S(t) = A(t) \cos[\omega_0 t - \theta(t)] = X(t) \cos(\omega_0 t) + Y(t) \sin(\omega_0 t). \quad (6.1)$$

Равенство (6.1) выполняется при следующих условиях:

$$\theta(t) = \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2}; \quad A(t) = \arctg \frac{Y(t)}{X(t)}.$$

Схематически модуляционная посылка может быть представлена вектором на фазовой плоскости (рис. 6.1).

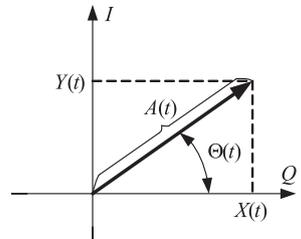


Рис. 6.1. Представление модуляционной посылки на фазовой плоскости

Упрощенная схема квадратурного модулятора представлена на рис. 6.2.

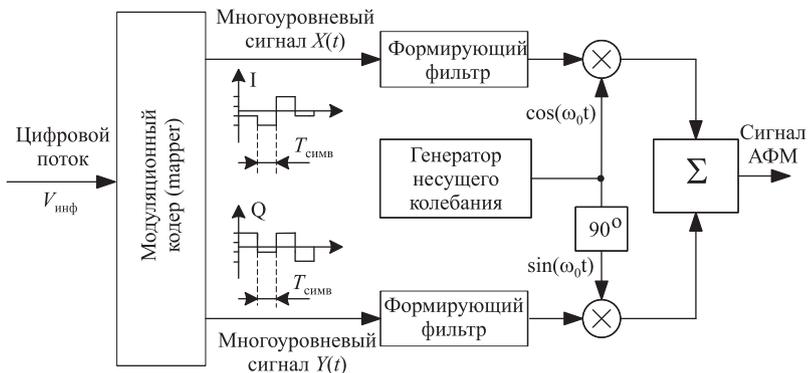


Рис. 6.2. Схема квадратурного модулятора

6.1.2. Модуляционное кодирование

Набор разрешенных (эталонных) позиций сигнальных векторов составляет сигнальную диаграмму, или сигнальное созвездие. Число позиций может быть от 2 до 1000 и более. Каждой позиции сигнала ставится в соответствие битовая кодовая комбинация. Число битов в комбинации $n = \log_2 M$, где M — число позиций. Расстановка кодовых комбинаций по конкретным позициям называется модуляционным кодированием. От выбора схемы модуляционного кодирования зависит помехоустойчивость сигнала, надежность работы систем синхронизации, устойчивость к нелинейным искажениям [15]. Модуляционное кодирование может быть совмещено с помехоустойчивым кодированием. При этом избыточность отражается на виде сигнальной диаграммы.

6.1.3. Код Грея

При демодуляции многопозиционных сигналов наиболее вероятной является ошибка различения соседних позиций. Для уменьшения числа ошибочных битов применяются коды, в которых комбинации, соответствующие соседним числам, различаются только одним разрядом. Это так называемые рефлексные (отраженные, симметричные) коды (от лат. reflexio — отражение). Своё название коды получили вследствие симметричности комбинаций в кодовой таблице, которая проявляется совпадением элементов части разрядов. В рефлексных кодах не присваивается постоянного веса отдельным разрядам, они относятся к классу невзвешенных кодов.

Наиболее распространенным представителем таких кодов является код Грея (рис. 6.3). В n -значном коде Грея ось симметрии проходит между числами $2^{n-1} - 1$ и 2^{n-1} . Комбинации кода в табл. 6.1 получены согласно следующему правилу: кодовая комбинация натурального кода складывается по модулю 2 с такой же комбинацией, сдвинутой на один разряд, при этом младший разряд сдвинутой комбинации отбрасывается.

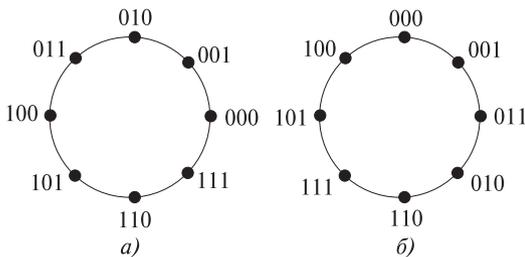


Рис. 6.3. Пример применения кода Грея при модуляционном кодировании: а — взвешенный код; б — код Грея

Таблица 6.1

Таблица кода Грея

Десятичное число	НДК	Код Грея	Десятичное число	НДК	Код Грея
0	0000	0000	8	1000	1100
1	0001	0001	9	1001	1101
2	0010	0011	10	1010	1111
3	0011	0010	11	1011	1110
4	0100	0110	12	1100	1010
5	0101	0111	13	1101	1011
6	0110	0101	14	1110	1001
7	0111	0100	15	1111	1000

При модуляционном кодировании двоичные коды, оптимальные по критерию максимума свободного хэммингова расстояния, оптимальны и по критерию максимума свободного евклидова расстояния, если при отображении двоичных подблоков в сигнальные точки ансамбля выполняется принцип: большему расстоянию Хэмминга d_h соответствует большее расстояние по Евклиду d_e [16].

6.1.4. Дифференциальное кодирование

В схемах демодуляторов сигналов квадратурной модуляции (за исключением некогерентных фазоразностных демодуляторов) обязательно присутствует операция комплексного умножения на гармоническое колебание несущей частоты, которое с большой точностью вырабатывается системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Система ФАПЧ отслеживает отклонение демодулированных векторов от эталонных значений, подстраивает частоту и фазу внутреннего генератора несущей частоты, но в виду симметричности амплитудно-фазовой структуры сигнала фаза внутреннего генератора демодулятора будет приведена к одному из четырех значений, кратных $\pi/2$. В результате этого после демодуляции получается сигнальная диаграмма (созвездие), повернутая на неопределенный угол, кратный $\pi/2$. Для правильной работы модуляционного декодера, т. е. правильной привязки амплитудно-фазовых позиций к передаваемым битовым комбинациям, требуется устранить неоднозначность фазы.

Применяются три основных способа борьбы с неоднозначностью. Первый из них — это перебор четырех вариантов фазы с выбором по правильности конечного результата. В этом случае в цифровом потоке должна быть определенная избыточность, позволяющая автоматически обнаружить требуемый результат. Это могут быть какие-либо известные комбинации синхронизации либо проверочные комбинации помехоустойчивого кода, либо контрольные суммы. Другой способ устранения фазовой неоднозначности предполагает настройку



Рис. 6.4. Дифференциальное кодирование при относительной фазовой модуляции

фазы в начале передачи модулированного сигнала с помощью специальной настроечной комбинации, которую называют либо преамбулой, или трайнингом (training). Фаза внутреннего генератора демодулятора первоначально настроивается по этой настроечной комбинации, затем может длительно удерживаться и подстраиваться по информационным символам с помощью системы ФАПЧ. Колебание генератора демодулятора при этом совпадает по фазе с колебанием модулятора, а фаза модуляционных посылок измеряется относительно фазы этого колебания без неоднозначности. Модуляция в таком режиме называется абсолютно-фазовой. Третий, весьма распространенный, метод борьбы с неоднозначностью заключается в привязке информации к разности фаз между соседними посылками. Такой вид модуляции называется относительно-фазовой модуляцией. Внесение информации в разность символов называется дифференциальным кодированием. Относительная или фазоразностная модуляция обладает худшей помехоустойчивостью, так как при вычислении разности фаз участвуют две посылки, фаза каждой из которых при наличии шума оценивается с некоторой ошибкой. При вычислении разности фаз ошибка фактически удваивается.

В модуляторах дифференциальное кодирование битового потока проводится еще до непосредственно модуляции, а в демодуляторах дифференциальное декодирование сводится также к обработке битового потока. Схема дифференциального кодера и декодера при передаче сигналов двухпозиционной фазовой модуляции приведена на рис. 6.4.

Для четырехпозиционной модуляции можно применить схожую схему, в которой цифровой поток разбивается по два бита, а в схемах задержки задерживаются за один такт сразу два бита. В таком дифференциальном кодере производится сложение по модулю 4, в декодере — вычитание по модулю 4. Привязка битов к фазе посылок должна быть в данном случае по возрастанию: 0° — два бита 00, 90° —

01, 180° — 10, 270° — 11. Такое кодирование явно уступает кодированию кодом Грея, и подобная схема при четырехпозиционной фазовой модуляции практически не применяется.

При организации дифференциального кодирования в многопозиционных сигналах квадратурной модуляции симметричность сигнальных созвездий позволяет разбить задачу модуляционного декодирования на два этапа. Все сигнальное созвездие состоит из четырех одинаковых (инвариантных к повороту на угол, кратный $\pi/2$) квадрантов. В каждом квадранте можно одинаковым образом закодировать каждую позицию. Номер квадранта при дифференциальном кодировании не кодируется абсолютно, а кодируются четыре варианта перехода сигнальных векторов соседних символов из квадранта в квадрант. Например, был вектор одного символа (модуляционной посылки) в одной из позиций одного из квадрантов, затем вектор следующего символа оказался на одной из позиций квадранта, повернутого относительно предыдущего квадранта по часовой стрелке на один из четырех углов 0, 90, 180 или 270° . Такое событие кодируется двумя битами. Конкретное место (позиция) в квадранте последней принятой посылки кодируется числом битов $l = \log_2 Q$, где Q — число позиций в одном квадранте. Всего получается, что одна модуляционная посылка переносит $n = l + 2 = \log_2 M$ битов, где M — общее число позиций в сигнальном созвездии.

6.1.5. Офсетная модуляция

При одновременной смене символов в обоих каналах модулятора в сигнале QPSK происходит скачок фазы на 180° . Такие скачки фазы, также имеющие место и при обыкновенной двухфазной модуляции (ФМ-2), вызывают паразитную амплитудную модуляцию огибающей сигнала. В результате этого при прохождении сигнала через узкополосный фильтр возникают провалы огибающей до нуля. Такие изменения сигнала нежелательны, поскольку приводят в конечном итоге к снижению эффективности использования энергетике ретранслятора.

Четырехфазная ФМ со сдвигом (Offset QPSK, OQPSK) позволяет избежать скачков фазы на 180° и, следовательно, глубокой модуляции огибающей. Формирование сигнала в квадратурной схеме происходит так же, как и в модуляторе ФМ-4, за исключением того, что манипуляционные элементы информационной последовательности $X(t)$ и $Y(t)$ смещены во времени на длительность одного бита, как показано на рис. 6.5,б, синфазного или квадратурного канала и может вызвать изменение фазы на 0° , $+90^\circ$ или -90° .

Символьная скорость при модуляции со сдвигом в два раза выше, чем в обычной ФМ-4, но ширина спектра остается как при ФМ-4, так

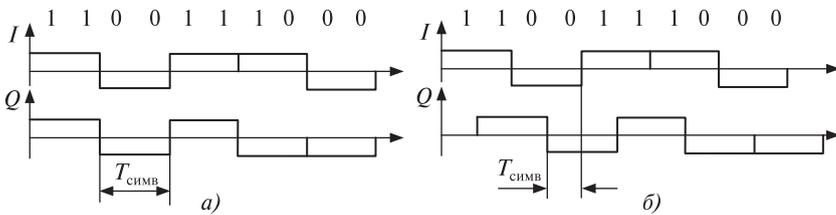


Рис. 6.5. Формирование квадратурных составляющих для сигналов QPSK (а), O-QPSK (б)

как квадратурные составляющие остаются без изменения, претерпевая только сдвиг. Изменение фазы при таком смещении модулирующих потоков определяется лишь одним элементом последовательности, а не двумя, как при ФМ-4. В результате скачки фазы на 180° отсутствуют.

6.1.6. Формирование сигналов частотной модуляции квадратурным способом. Модуляция с минимальным сдвигом

Кроме амплитудно-фазовой модуляции, квадратурным способом может быть сформирован также сигнал частотной модуляции. При частотной модуляции квадратурные составляющие $X(t)$ и $Y(t)$ на символьных интервалах следует представить в виде отрезков гармонических функций с частотой Ω , задающей девиацию частоты. На выходе квадратурного модулятора в данном случае получается гармоническое колебание со сдвинутой частотой

$$\begin{aligned} X(t) \cos(\omega_0 t) + Y(t) \sin(\omega_0 t) &= \\ = \sin(\Omega t) \cos(\omega_0 t) + \cos(\Omega t) \sin(\omega_0 t) &= \sin[(\omega_0 + \Omega)t]. \end{aligned}$$

На рис. 6.6,а показаны квадратурные составляющие сигнала частотной модуляции с минимальным сдвигом (ММС) (Minimum (frequency) Shift Keying, MSK). Данный вид модуляции широко применяется в наземных системах подвижной связи. В спутниковых системах связи применяется ограничено.

Сигнал ММС характеризуется следующими особенностями:

- между девиацией частоты Δf_m и скоростью передачи $V = 1/T_0$ существует определенная связь, т.е. $\Delta f_m = V/4 = 1/4T_0$;
- индекс частотной модуляции ММС $m_{\text{чм}} = 2\Delta f_m/V = 0,5$;
- закон изменения фазы $(\omega_{\text{н}}t + \varphi(t))$ имеет вид кусочно-ломаной прямой без разрывов в тактовых точках, набег фазы $\varphi(t)$ на длительности элемента составляет $\pm 90^\circ$ (рис. 6.6,б);

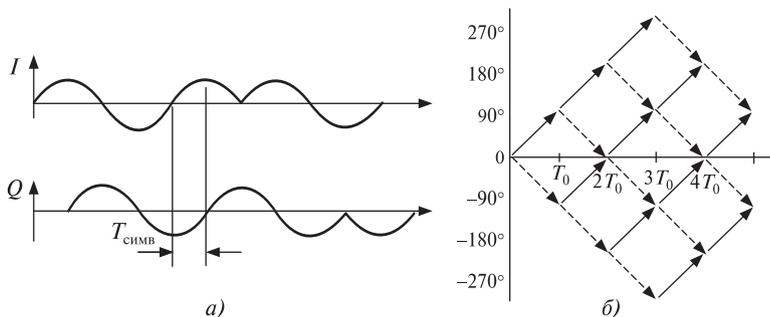


Рис. 6.6. Формирование квадратурных составляющих (а) и изменение фазы в сигнале MSK (б)

- отсутствуют изменения огибающей сигнала на тактовых интервалах.

В сотовых системах связи стандарта GSM применяется гауссовская частотная модуляция с минимальным сдвигом (GMSK), отличающаяся тем, что квадратурные составляющие (см. рис. 6.6, а) пропускаются через фильтр с гауссовской характеристикой.

6.1.7. Решетчатое кодирование

При передаче сигналов амплитудно-фазовой модуляции есть возможность повышения помехоустойчивости за счет введения избыточных сигнальных точек с ограниченными последовательностями (переходами между точками). Подобный вид формирования сигнала называется модуляцией с решетчатым кодированием (Trellis-Coded Modulation, TCM). Избыточность при решетчатом кодировании вводится с помощью сверточного кодера, позволяющего использовать при декодировании последовательность ранее принятых символов. Сверточный кодер может быть систематическим, вырабатывающим добавочные биты к передаваемым без изменения входным битам (рис. 6.7, а), либо несистематическим, полностью изменяющим входные биты (рис. 6.7, б). Добавление одного избыточного бита решетчатым кодером приводит к увеличению числа амплитудно-фазовых позиций в два раза. Символьная скорость и, соответственно, полоса частот не изменяются.

Увеличение числа позиций ухудшает условия их различения, но при выборе точек демодулятором (декодером) перед принятием жесткого решения о данных определяется, какая из допустимых последовательностей сигналов наиболее близка к принятой последовательности. Следует отметить, что решетчатое кодирование особыми методами со-

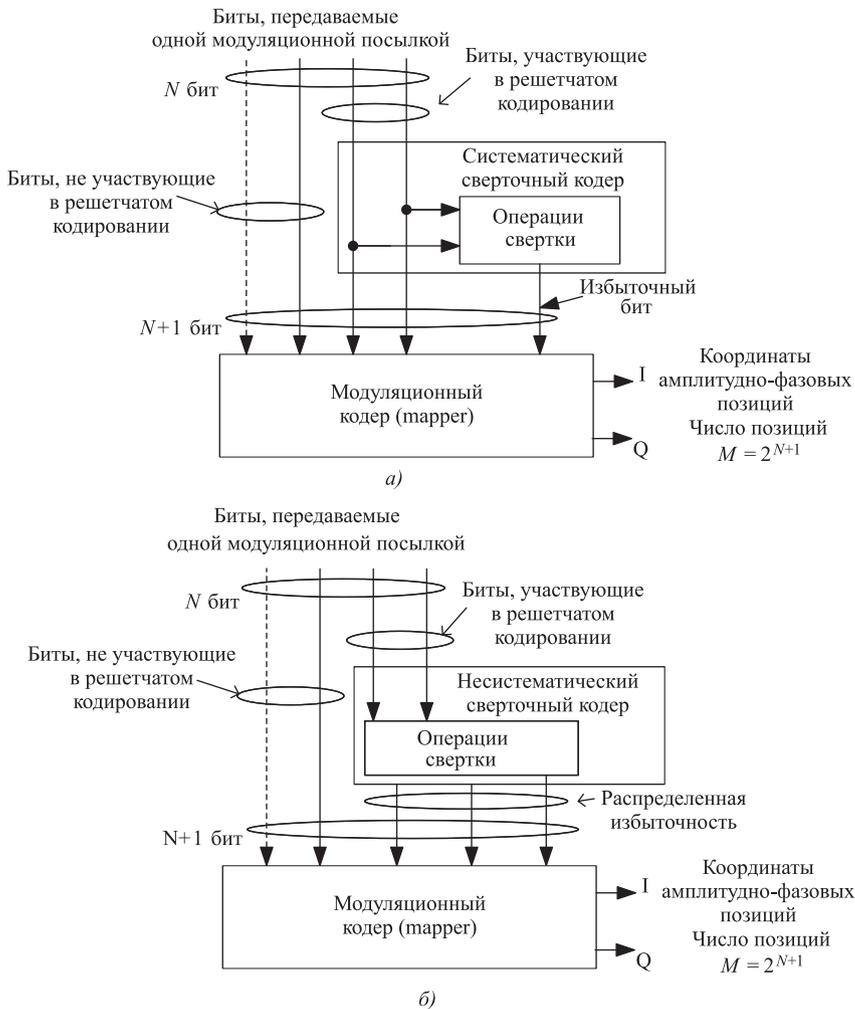


Рис. 6.7. Варианты решетчатого кодирования

четают с дифференциальным кодированием для повышения эффективности решения задачи устранения фазовой неоднозначности.

Использование избыточности декодером не только компенсирует ухудшение различимости позиций из-за увеличения их числа, но и позволяет повысить помехоустойчивость приема по сравнению с модуляцией с малым числом позиций. Например, помехоустойчивость часто применяемой в спутниковых системах связи модуляции ФМ-8 с решетчатым кодированием (ТСМ-8) выше, чем у обычной ФМ-4 (QPSK), на 3 дБ.

6.1.8. Фильтрация модулированных сигналов

Спектральная плотность нефильтрованного сигнала амплитудно-фазовой модуляции характеризуется кривой $(\sin x/x)^2$, занимая бесконечную полосу частот. Для минимизации влияния межсимвольной интерференции в большинстве случаев сигналы АФМ фильтруют с использованием фильтра Найквиста с характеристиками скатов в виде приподнятого косинуса (рис. 6.8). Фазочастотная характеристика фильтров Найквиста должна быть линейной. Амплитудно-частотная характеристика низкочастотного формирующего фильтра Найквиста, входящего в состав квадратурной схемы модулятора, описывается выражением

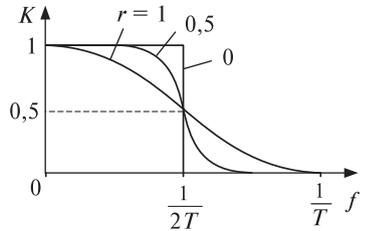


Рис. 6.8. Характеристика фильтра Найквиста типа «приподнятый косинус»

$$K(f) = \begin{cases} 1 & \text{для } f \leq \frac{1-r}{2T}; \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi f T}{r} - \frac{\pi(1-r)}{2r} \right) \right] & \text{для } \frac{1-r}{2T} \leq f \leq \frac{1+r}{2T}; \\ 0 & \text{для } f > \frac{1+r}{2T}. \end{cases}$$

где T — символьный интервал (длительность модуляционной посылки); r — коэффициент расширения полосы, или коэффициент ската (Rolloff Factor).

Крутизна ската характеристики фильтра Найквиста определяет занимаемую полосу частот. Естественно желание уменьшить коэффициент r , но, к сожалению, фильтрация сигнала фильтром с крутыми скатами усугубляет воздействие нелинейных искажений, обязательно присутствующих в спутниковых каналах. В большинстве спутниковых модемов применяются фильтры с параметром Rolloff Factor, равным 0,2, 0,25 или 0,3.

Спектр передаваемого АФМ сигнала часто формируется так, чтобы его характеристики описывались корнем квадратным из приведенной выше характеристики по Найквисту. Приемный фильтр демодулятора конструируют так, чтобы он имел характеристику в виде корня квадратного из характеристики по Найквисту, таким образом спектр сигнала на входе демодулятора имеет суммарную характеристику по Найквисту. При использовании этого метода фильтрации с характеристикой, описываемой корнем квадратным из характеристики по Найквисту, как на передающей, так и на приемной стороне ре-

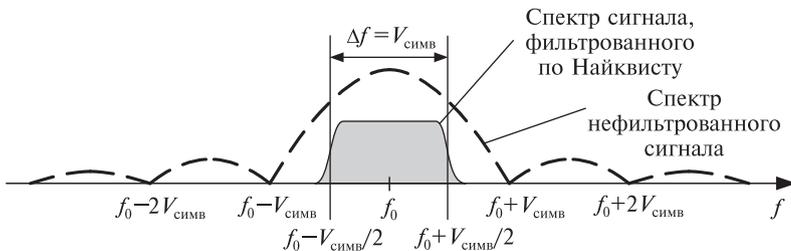


Рис. 6.9. Полоса частот фильтрованного сигнала амплитудно-фазовой модуляции

ализуется прием с оптимальным согласованным фильтром при минимальных межсимвольных помехах и помехах по соседнему каналу одновременно.

Полоса частот модулированного сигнала определяется фильтрами, формирующими квадратурные составляющие сигнала. Каждая отдельно взятая квадратура после умножения на несущую будет иметь симметричный спектр, но после сложения квадратурных сигналов спектр будет несимметричным. Полоса частот по Найквисту будет равняться символьной скорости. На рис. 6.9 схематически показан спектр сигнала АФМ на несущей частоте f_0 , имеющего символьную скорость (скорость передачи модуляционных посылок) $V_{СИМВ}$.

Учитывая почти повсеместное применение фильтрации по Найквисту, можно оценить символьную скорость наблюдаемого сигнала, измерив его полосу частот на уровне -3 дБ. Для определения информационной скорости, зависящей от числа амплитудно-фазовых позиций, знания ширины спектра недостаточно. Можно различить некоторые простейшие виды модуляции, например ФМ-2 и ФМ-4, офсетную модуляцию с помощью спектрального анализа сигналов, подвергшихся специальным нелинейным преобразованиям.

Следует отметить, что существует класс однополосных сигналов дискретной амплитудно-фазовой модуляции. Такие сигналы могут быть многопозиционными, но имеют только одну квадратурную составляющую, т. е. могут иметь несколько позиций амплитуды, но только две фазы 0° и 180° . Нефильтрованный сигнал с одной квадратурой имеет симметричный спектр, и у него может быть отфильтрована одна боковая полоса. Эти сигналы носят название АМ-ФМ-ОБП. Полоса частот таких сигналов равна половине символьной скорости. Сигналы АМ-ФМ-ОБП, несмотря на их высокую спектральную эффективность, имеют существенные недостатки и в спутниковых системах связи практически не применяются.

6.2. Помехоустойчивое кодирование в системах спутниковой связи

6.2.1. Классификация помехоустойчивых кодов

На сегодняшний день известно много различных классов помехоустойчивых кодов, отличающихся друг от друга структурой, функциональным назначением, энергетической эффективностью, алгоритмами кодирования и декодирования и многими другими параметрами [17]. Рассмотрим основные подходы к классификации данных кодов, представленной на рис. 6.10.

При одном подходе коды можно разбить на две группы: блочные, в которых кодирование и декодирование производится в пределах кодовой комбинации или блока, и древовидные, в которых обработка символов производится непрерывно, без разделения на блоки. Кодер для блочного кода является устройством без памяти, отображающим последовательности из k входных символов в последовательности из n выходных символов. Термин «без памяти» указывает, что каждый выходной блок из n символов зависит только от соответствующего входного блока из k символов и не зависит от других блоков.

Кодер для древовидного кода является устройством с памятью, в которое поступают наборы из k_0 входных символов, а на выходе появляются наборы из n_0 выходных символов. Каждый набор n_0 выходных символов зависит от текущего входного набора и от $K - 1$ предыдущих входных наборов. Параметр K называется конструктивной длиной сверточного кода, а величина $n_A = K n_0$ — длиной кодового ограничения.

Древовидные коды характеризуются также скоростью $r = k_0/n_0$

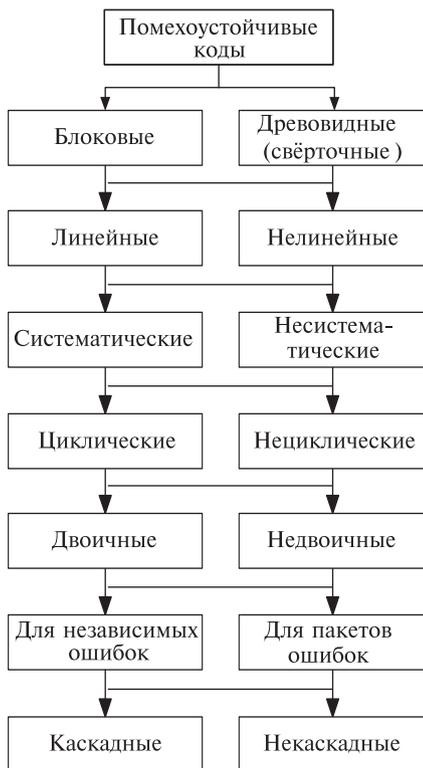


Рис. 6.10. Классификация помехоустойчивых кодов

и свободным расстоянием d_{free} , смысл которого будет пояснен далее при описании сверточных кодов.

В процессе работы кодер помехоустойчивого кода в соответствии с некоторыми правилами осуществляет обработку входных символов. В зависимости от количества возможных значений q каждого из символов все коды можно разделить на двоичные (при $q = 2$) и недвоичные (при $q > 2$).

Еще при одном подходе коды можно разделить на линейные и нелинейные. Линейные коды образуют векторное пространство и обладают следующим важным свойством: два кодовых слова можно сложить, используя подходящее определение суммы, и получить третье кодовое слово. В случае обычных двоичных кодов эта операция является посимвольным сложением двух кодовых слов по модулю 2. Данное свойство существенно упрощает процедуры кодирования и декодирования, а также задачу вычисления параметров кода, поскольку минимальное расстояние между двумя кодовыми словами при этом эквивалентно минимальному расстоянию между кодовым словом, состоящим целиком из нулей, и некоторым другим кодовым словом. Кроме того, при вычислении характеристик линейного кода достаточно рассмотреть, что происходит при передаче кодового слова, состоящего целиком из нулей. Линейные древовидные коды обычно называют сверточными.

Помехоустойчивые коды также можно разделить на коды, исправляющие случайные или независимые ошибки, и коды, исправляющие пакеты ошибок. На практике в основном применяются коды, исправляющие случайные ошибки, поскольку для исправления пакетов ошибок часто оказывается легче использовать коды для исправления независимых ошибок вместе с устройствами перемежения и восстановления [18]. Первое из них осуществляет перемешивание порядка символов в закодированной последовательности перед передачей в канал, а второе — восстановление исходного порядка символов после приема. При правильном проектировании данных устройств можно считать, что образующиеся в канале связи пакеты ошибок перед декодированием будут разбиты на случайные ошибки.

Почти все схемы кодирования, применяемые на практике, основаны на линейных кодах, поэтому более подробно рассмотрим способ их описания. Блочный код длины n с 2^k словами называется линейным (n, k) -кодом, если его кодовые слова образуют k -мерное подпространство V_k векторного n -мерного пространства V_n . Подпространство V_k порождается базисом из k линейно независимых векторов, которые

образуют строки порождающей матрицы (n, k) -кода

$$G_{n,k} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ \dots \\ g_{k-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{0,0} & g_{0,1} & \dots & g_{0,n-1} \\ g_{1,0} & g_{1,1} & \dots & g_{1,n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{k-1,0} & g_{k-1,1} & \dots & g_{k-1,n-1} \end{bmatrix}.$$

Процесс кодирования блокового кода состоит в разбиении информационной последовательности на сообщения $\bar{U} = (u_0, u_1, \dots, u_{k-1})$ длины k и отображении этих сообщений в кодовые слова $\bar{C} = (c_0, c_1, \dots, c_{k-1})$ длины n следующим образом:

$$\bar{C} = \bar{U}G.$$

Часто кодовые слова лучше представлять в систематической форме $\bar{C} = (\bar{U}, \bar{V})$, образуя отдельно информационную часть \bar{U} из k символов и проверочную часть \bar{V} из $m = n - k$ символов. Порождающая матрица такого систематического кода будет иметь вид

$$G_{n,k} = [I_k P] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & g_{0,0} & g_{0,1} & \dots & g_{0,n-1} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & g_{1,0} & g_{1,1} & \dots & g_{1,n-1} \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & g_{k-1,0} & g_{k-1,1} & \dots & g_{k-1,n-1} \end{bmatrix}.$$

В данном случае матрица G содержит единичную матрицу I_k размером $k \times k$, формирующую информационную часть слова, и матрицу P размером $k \times (n - k)$, определяющую проверочные символы.

С порождающей матрицей тесно связано понятие проверочной матрицы H , пространство строк которой ортогонально пространству строк порождающей матрицы, т. е. $GH^T = 0$.

Важный подкласс линейных кодов составляют циклические коды, обладающие циклическими свойствами: если $\bar{C} = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1})$ — кодовое слово циклического кода, тогда и $\bar{C}' = (c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, c_0)$, полученное циклическим сдвигом элементов \bar{C} , также является кодовым словом. Эти коды обладают большим количеством структурных особенностей, которые значительно упрощают реализацию операций кодирования и декодирования.

Порождающую матрицу G циклического кода можно записать в виде

$$G_{n,k} = \begin{bmatrix} g_0 & g_1 & \dots & g_{n-k} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & g_0 & g_1 & \dots & g_{n-k} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & g_0 & g_1 & \dots & g_{n-k} \end{bmatrix}.$$

Для компактной записи циклического (n, k) -кода часто исполь-

зуется порождающий или образующий полином $g(x)$ степени $n - k$ с коэффициентами из поля $\text{GF}(q)$ (для двоичных кодов $g_i = \{0, 1\}$)

$$g(x) = g_0 + g_1x + g_2x^2 + \dots + g_{n-k}x^{n-k}.$$

Если в виде полинома записать информационное сообщение $U(x)$ и кодовое слово $C(x)$, то кодовые слова кода образуются путем умножения сообщения на порождающий полином $C(x) = U(x)g(x)$.

Обычно для удобства записи коэффициенты образующих полиномов объединяют в двоичное слово и представляют в восьмеричной системе счисления. Также образующие полиномы можно записывать путем перечисления степеней с ненулевыми коэффициентами. Например, запись $g(x) = 1 + x + x^4 + x^6$ равносильна следующим: $g = 1010011_2 = 123_8$; $g = (0, 1, 4, 6)$.

6.2.2. Основные характеристики методов коррекции ошибок

Для оценки помехоустойчивости системы связи часто используют среднюю вероятность ошибки в информационном бите P_b или последовательности битов (кодového блока) P_B при определенном отношении сигнал-шум в канале связи. Данные вероятности ошибки могут быть определены по точным или приближенным формулам либо получены с помощью статистического моделирования системы связи на ЭВМ.

Для оценки вероятностей ошибки в бите P_b и блоке P_B линейного блокового кода длиной n , декодируемого с помощью декодера максимального правдоподобия (т. е. декодера, выбирающего из всех возможных кодовых слов то, которое находится на минимальном расстоянии от принятой из канала последовательности), можно воспользоваться аддитивной оценкой, характеризующейся достаточной точностью при большом отношении сигнал-шум:

$$P_B \leq \sum_{j=1}^n N_j P_c(j); \quad P_b \leq \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n j N_j P_c(j),$$

где k — количество информационных символов кода; N_j — число кодовых слов веса j ;

$$P_c(j) = \sum_{i=(j+1)/2}^j C_j^i p^i (1-p)^{j-i}$$

для двоичного симметричного канала (ДСК) при нечетном j ;

$$P_c(j) = \frac{1}{2} C_j^{i/2} p^{i/2} (1-p)^{(j-i)/2} + \sum_{i=(j+1)/2}^j C_j^i p^i (1-p)^{j-i}$$

для канала ДСК при нечетном j ;

$$P_c(j) = Q\left(\sqrt{\frac{2jE_s}{N_0}}\right)$$

для канала с АВГШ. Здесь p — вероятность битовой ошибки на входе декодера (т.е. в канале); E_s/N_0 — отношение сигнал-шум в канале;

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\tau^2/2} d\tau.$$

Недостатками данных оценок вероятности ошибки является их неточность при малом отношении сигнал-шум и необходимость определения спектра кода, что часто является достаточно трудной задачей [19]. Поэтому для некоторых кодов при их описании будут рассмотрены более простые и точные границы вероятностей ошибки.

Еще одной, не менее важной характеристикой, является энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), показывающий величину снижения энергии, необходимой для передачи одного бита данных при некоторой выбранной средней вероятности ошибки на бит P_b в случае использования тех или иных алгоритмов кодирования и декодирования по сравнению со случаем, когда кодирования нет. Зарубежные специалисты оценивали каждый децибел ЭВК в миллионы долларов более 20 лет назад. Сейчас ценность ЭВК еще более возросла, поскольку он позволяет уменьшать размеры очень дорогих антенн, повышать дальность связи, увеличивать скорость передачи, снижать необходимую мощность передатчика и улучшать другие важные свойства систем связи.

При оценке эффективности алгоритмов декодирования различных кодов полезно знать предельные (или асимптотические) для малого шума характеристики данных кодов.

Асимптотический ЭВК зависит только от скорости кода R и кодового расстояния d , и для системы с двоичной фазовой модуляцией при приеме без квантования он равен

$$G_a = 10 \lg(Rd).$$

В случае использования ДСК

$$G_a = 10 \lg(R(t+l)),$$

где t — максимальное целое, меньшее, чем $d/2$, определяющее число исправляемых кодом ошибок. Из сопоставления последних двух выражений видно, что при приеме в целом в пределе обеспечивается на 3 дБ больший ЭВК, чем при использовании жестких решений демо-

дулятора. Однако при реальных отношениях сигнал-шум и умеренных значениях d разница обычно близка к 1...2 дБ. Использование же мягкого модема с квантованием выходного значения на 8 и 16 уровней уменьшает ЭВК по сравнению с приемом в целом примерно на 0,25 и 0,1 дБ соответственно.

Среди других характеристик алгоритмов декодирования выделим сложность их реализации (как программной, так и аппаратной). Данная характеристика имеет чрезвычайно большое значение, так как, применяя очень сложные методы декодирования, можно получить весьма высокие значения ЭВК, но при этом практическое использование данных алгоритмов будет невозможно.

В следующих разделах рассмотрим помехоустойчивые коды, наиболее часто применяющиеся в спутниковых системах связи.

6.2.3. Сверточные коды

Для построения кодера сверточного кода необходимо k_0 регистров сдвига, связи между элементами которых определяются набором образующих полиномов $g_{(ij)}(x)$, где $i = 0, 1, \dots, k_0 - 1$ — номер входного потока, а $j = 0, 1, \dots, n_0 - 1$ — номер выходного потока. Поскольку на практике чаще используются коды с единственным входным потоком ($k_0 = 1$), индекс i обычно опускается. Еще одной характеристикой сверточного кода является его конструктивная длина K , влияющая на сложность его декодирования и равная длине самого длинного регистра сдвига.

На рис. 6.11 приведена схема одного из стандартного, очень широко применяемого в различных системах связи несистематического сверточного кодера с длиной кодового ограничения $K = 7$ с образующими полиномами $g_1(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^5 + x^6$, $g_2(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^6$. В двоичной и восьмеричной форме $g_1 = 1011011_2 = 133_8$; $g_2 = 1111001_2 = 171_8$.

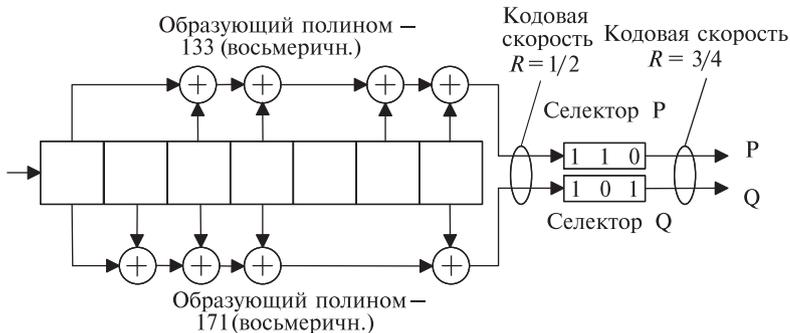


Рис. 6.11. Кодер несистематического перфорированного сверточного кода

Кодер, изображенный на рис. 6.11, применяется совместно с устройством селекции, или прореживания, которое называется перфоратором. Код в данном случае называется перфорированным или пунктурным. В конкретном кодере до перфорации кодовая скорость $R = 1/2$, после перфорации скорость $R = 3/4$.

6.2.4. Блочные коды

Одними из самых простых являются коды Хэмминга, представленные Хэммингом в 1950 г. К данным кодам относятся линейные блочные коды с параметрами (n, k) вида $(2^m - 1, 2^m - m - 1)$, где $m = n - k$ — число проверочных символов кода. Коды Хэмминга обладают кодовым расстоянием $d = 3$ и поэтому способны исправлять только одну или обнаружить две ошибки.

Коды Боуза-Чоудхури-Хоквингема (БЧХ) представляют собой класс линейных циклических кодов, исправляющих кратные ошибки, и являются обобщением ранее описанных кодов Хэмминга. Коды БЧХ обычно задаются через корни порождающего многочлена $g(x)$ степени $n - k$. Данные коды определяются следующим образом.

Примитивным кодом БЧХ, исправляющим t ошибок, называется блочный код длиной $n = q^m - 1$ над полем Галуа $\text{GF}(q)$, для которого элементы $a^{m_0}, a^{m_0+1}, \dots, a^{m_0+2t-1}$ (для произвольного m_0) являются корнями порождающего многочлена $g(x)$, где a — примитивный элемент поля $\text{GF}(q^m)$.

Основываясь на представленном определении, порождающий многочлен кода БЧХ можно записать в виде

$$g(x) = \text{НОК}(m_{m_0}(x), m_{m_0+1}(x), \dots, m_{m_0+2t-1}(x)),$$

где $m_c(x)$ — минимальная функция a^c в поле $\text{GF}(q)$, причем в случае двоичных кодов БЧХ наименьшее общее кратное (НОК) ищется только для минимальных функций с нечетными индексами.

Непримитивные коды БЧХ определяются аналогично, но примитивный элемент a заменяется непримитивным элементом β поля $\text{GF}(q^m)$ и длина блока становится равной порядку β .

Важный подкласс кодов БЧХ составляют коды Рида-Соломона, для которых $m = m_0 = 1$. Эти недвоичные коды характеризуются следующими параметрами:

- длина блока $n = q - 1$, выраженная числом q -ичных символов;
- количество информационных символов k от 1 до $n - 1$;
- минимальное кодовое расстояние $d = -n - k + l$;
- кодовая скорость $r = k/n$.

Для задания кодов Рида–Соломона используется порождающий многочлен вида

$$g(x) = (x - a)(x - a^2)\dots(x - a^{2t}),$$

где $t = \lfloor 1/2(d - 1) \rfloor$.

Поскольку образующий полином имеет степень $2t$, возможно использование всего лишь $2t$ проверочных символов для исправления пакетов из t ошибок. Последнее свойство позволило найти данным кодам достаточно широкое применение в каскадных методах кодирования. Кроме того, для декодирования кодов Рида–Соломона существуют достаточно эффективные алгоритмы декодирования жестких решений, что позволяет использовать относительно длинные коды во многих практических приложениях, в том числе в системах цифрового спутникового телевидения.

6.2.5. Каскадные схемы кодирования

Важным этапом в развитии теории кодирования является появление каскадных кодов, в основе построения которых лежит идея совместного использования нескольких составляющих кодов. Данный подход позволил существенно повысить эффективность применения кодирования по сравнению с базовыми некаскадными методами.

Пример использования каскадного кода, состоящего из двух составляющих кодов, показан на рис. 6.12. Здесь данные источника сначала кодируются внешним (n_1, k_1) -кодом. В качестве внешнего кода часто используются двоичные коды, например коды Рида–Соломона. Затем закодированные символы внешнего кода кодируются кодером внутреннего (n_2, k_2) -кода. Общая длина кодового слова каскадного кода оказывается равной $N = n_1 n_2$ двоичных символов, причем $K = k_1 k_2$ из них являются информационными. Следовательно, кодовая скорость полученного каскадного кода оказывается равной

$$R = \frac{K}{N} = \frac{k_1 k_2}{n_1 n_2} = r_1 r_2,$$

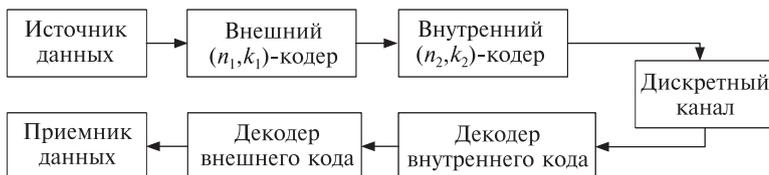


Рис. 6.12. Пример системы связи, использующей последовательный каскадный код с двумя составляющими кодами

где r_1, r_2 — кодовые скорости составляющих кодеров. Также отметим, что минимальное расстояние сформированного каскадного кода будет равно $D = d_1 d_2$, где d_1 и d_2 — минимальные расстояния составляющих кодов.

Декодирование каскадного кода осуществляется в обратном порядке, т. е. принятая из канала последовательность сначала декодируется декодером внутреннего кода, а затем полученная последовательность декодируется декодером внешнего кода. Подчеркнем, что хотя общая длина кода равна N , структура каскадного кода позволяет применять для декодирования два декодера кодов с длинами всего лишь n_1 и n_2 соответственно. Данное свойство позволяет существенно снизить сложность декодирования по сравнению с сопоставимыми по эффективности декодерами некаскадных блоковых или сверточных кодов.

Наиболее широкое распространение в реальных системах связи нашла каскадная схема, в которой внешним кодом является код Рида–Соломона, а внутренним — сверточный код, обычно декодируемый с помощью оптимального алгоритма Витерби. Часто в данной схеме между внешним и внутренним кодером/декодером включаются устройства перемежения и восстановления (деперемежения), осуществляющие псевдослучайную перестановку символов внешнего кода и восстановление исходного порядка символов соответственно. Рассмотренные устройства предназначены для разбиения пакетов ошибок, появляющихся при декодировании принятого из канала сообщения с помощью декодера внутреннего кода (алгоритма Витерби), что позволяет существенно улучшить эффективность всей каскадной конструкции.

6.2.6. Турбокоды

Турбокоды образуются при параллельном каскадировании двух или более составляющих систематических кодов. Рассмотрим общую схему кодера турбокода, изображенную на рис. 6.13.

Как показано на рисунке, передаваемые данные перед кодированием каждым из составляющих кодов перемешиваются с помощью входящих в состав кодера перемежителей. Поскольку систематические выходы каждого из кодеров с учетом перемежения идентичны, в канал можно передавать только исходную последовательность и проверочные выходы каждого из кодеров. В результате общая кодовая скорость турбокода при использовании составляющих кодов со скоростью $1/2$ оказывается равной $R = 1/(M + 1)$, где M — количество составляющих кодеров. Затем систематические и проверочные биты

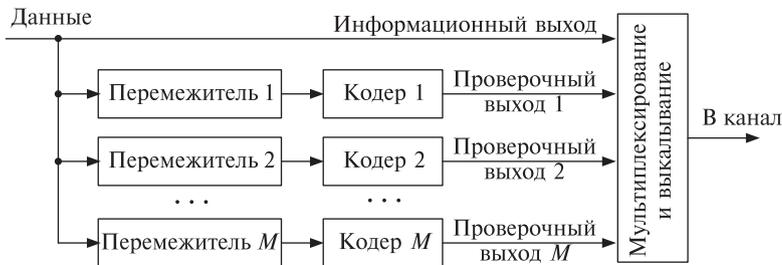


Рис. 6.13. Общая схема кодера турбокода

от всех составляющих кодеров объединяются в одно кодовое слово, передаваемое по каналу связи.

Обычно при построении турбокодера используются два одинаковых рекурсивных систематических сверточных кодера без перемежения в первой ветви. Применение таких составляющих кодов совместно с перемежителем позволяет уменьшить число кодовых слов низкого веса, определяющих эффективность турбокода при большом уровне шума в канале связи.

6.2.7. Коды LDPC

В последнее десятилетие теория помехоустойчивого кодирования интенсивно развивается в направлении исследований, посвященных синтезу итеративных алгоритмов декодирования и конструированию итеративно декодируемых кодов. Вслед за турбокодами, начиная с 2004–2005 годов, на спутниковых линиях связи стали применяться низкоплотностные коды, впервые описанные Галлагером еще в 60-х годах XX века. В 70-х и 80-х годах коды с низкой плотностью проверок на четность (коды LDPC — low-density parity-check codes) не считались перспективными. Тем не менее идеи Галлагера все же получили развитие в работах ряда исследователей. Было доказано, что минимальное расстояние кодов Галлагера линейно растет с увеличением длины кодового слова и что также линейно возрастает сложность алгоритма декодирования. Эти качества, а также прогресс СВИС-технологий возвратили интерес к низкоплотностным кодам в конце 90-х годов, когда на примерах кодов LDPC большой размерности было показано, что по эффективности они сравнимы и даже превосходят турбокоды при равной длине кодового слова. В настоящее время теория построения кодов LDPC развивается и продолжается совершенствование алгоритмов декодирования. Тем не менее разработки ученых, реализованные в виде специализированных СВИС-кодеков или программных модулей для ПЛИС, уже нашли практическое приме-

нение в различных областях связи, например на ВОЛС и в системах WiMax. Использование кодов LDPC предусмотрено стандартом цифрового спутникового телевизионного вещания DVB-S.2.

6.2.8. Перемежители

Перемежение — безызбыточное преобразование цифрового потока, заключающееся в перестановке битов по определенному закону, широко распространено в цифровых системах связи, в которых применяется помехоустойчивое кодирование. Классическое предназначение перемежения — преобразование пачечной статистики ошибок, характерной для некоторых каналов связи, в поток разнесенных ошибок со статистикой, позволяющей эффективно использовать коды и алгоритмы декодирования, предназначенные для борьбы с ошибками со случайной статистикой. При таком подходе последовательность на выходе кодера подвергается перемежению до передачи по каналу и восстанавливается перед декодированием (рис. 6.14). Устройство перемежения переупорядочивает (переставляет) символы передаваемой последовательности детерминированным образом. Обратную операцию, восстанавливающую исходный порядок следования символов, выполняет устройство деперемежения.

Физический канал в спутниковых линиях, в отличие от ВЧ линий связи, обычно не рассматривается как канал с пачечной структурой ошибок, тем не менее возникающие при демодуляции сигнала одиночные ошибки после логических операций дифференциальной обработки и дескремблирования размножаются, приобретая характер пачки. Декодирование сверточных кодов по алгоритму Витерби при определенных условиях также порождает ошибки пачечной структуры. Эти обстоятельства в большей степени определяют практику использования устройств перемежения и деперемежения в оборудовании линий ССС.

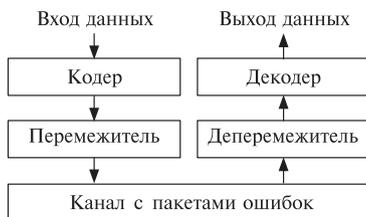


Рис. 6.14. Применение перемежения при использовании помехоустойчивого кодирования



Рис. 6.15. Применение перемежения при каскадном помехоустойчивом кодировании

В ССС может использоваться каскадное кодирование в виде сочетания двух кодов. При этом перемежение применяется между внутренним и внешним кодированием, как показано на рис. 6.15. Стандарты Intelsat для служб IDR и IBS предусматривают применение сверточного кода в качестве внутреннего кода и кода Рида–Соломона в качестве внешнего. На выходе внутреннего декодера, реализующего алгоритм Витерби, ошибки группируются в пакеты при малом отношении сигнал/шум на входе демодулятора. Устройство деперемежения, преобразуя статистику ошибок, позволяет эффективно применять декодер Рида–Соломона.

Методы перемежения. Известны два метода перемежения: блочное и сверточное. Устройство блочного перемежения записывает блок из последовательности L символов, поступающих с выхода кодера. В зависимости от порядка считывания различают матричные (табличные) и псевдослучайные блочные перемежители. В матричных блочных перемежителях символы записываются в столбцы матрицы, состоящей из N строк и B столбцов. Считывание производится по строкам матрицы.

Схемы сверточного устройства перемежения и устройства деперемежения представлены на рис. 6.16.

Сверточный перемежитель разбивает входную последовательность на B подпотоков и вносит задержку на $(i - 1)j$ битов в i -й подпоток ($i = 1, \dots, B$). При деперемежении в i -й подпоток вносится задержка $(B - i)j$ битов, и общая задержка в звене перемежитель — деперемежитель для всех подпотоков выравнивается. Параметр $J = jB$ характеризует минимальное разнесение соседних входных символов, реализуемое перемежителем.

Работа устройств перемежения и деперемежения должна быть синхронизирована для правильного разбиения последовательности на подпотоки. Для синхронизации блочных и сверточных деперемежителей в перемеженный поток могут вводиться дополнительные биты синхронизации (или размещаться на позициях проверочных символов кодовых блоков), но могут и не вводиться, если начальная установка демультиплексора деперемежителя обеспечивается внешней (системной) синхронизацией.

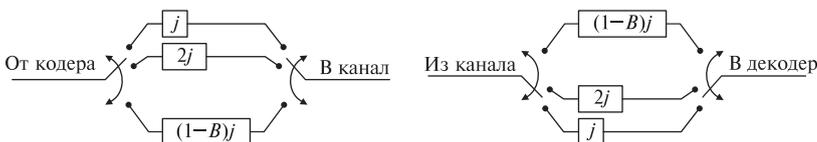


Рис. 6.16. Устройства сверточного перемежения и деперемежения

6.3. Сравнение эффективности различных видов модуляции и помехоустойчивого кодирования

В современных спутниковых модемах применяются различные сочетания видов модуляции и помехоустойчивого кодирования. Можно провести сравнительный анализ качественных показателей применения тех или иных методов модуляции и кодирования в современных спутниковых модемах по данным табл. 6.2. Лучшие показатели можно отметить у модемов с применением кодов LDPC и турбокодов.

Таблица 6.2

Параметры спутниковых модемов

Режим	E_b/N_0 , дБ, при $P_{\text{ош}} = 10^{-6}$	E_b/N_0 , дБ, при $P_{\text{ош}} = 10^{-8}$	Спектральная эффективность, бит/с/Гц
Скорость 1/2 Витерби	5,5	6,8	1,00
VPSK скорость 1/2 LDPC	1,7	1,9	0,50
VPSK скорость 21/44 TPC	2,6	2,9	0,48
VPSK скорость 5/16 TPC	2,1	2,4	0,31
QPSK/OQPSK скорость 1/2 LDPC	1,7	1,9	1,00
QPSK/OQPSK скорость 1/2 TPC	2,6	2,8	0,96
QPSK/OQPSK скорость 2/3 LDPC	2,1	2,3	1,33
QPSK/OQPSK скорость 3/4 LDPC	2,7	2,9	1,50
QPSK/OQPSK скорость 3/4 TPC	3,3	4,0	1,50
QPSK/OQPSK скорость 7/8 TPC	4,0	4,2	1,75
QPSK/OQPSK скорость 0,95 TPC	6,0	6,5	1,90
8-PSK скорость 2/3 TCM и RS	5,6	6,2	1,82
8-QAM скорость 2/3 LDPC	4,3	4,5	2,00
8-QAM скорость 3/4 LDPC	4,7	5,0	2,25
8-PSK скорость 3/4 TPC	5,7	6,3	2,25
8-PSK скорость 7/8 TPC	6,6	6,8	2,62
8-PSK скорость 0,95 TPC	8,9	9,9	2,85
16-QAM скорость 3/4 LDPC	6,4	6,6	3,00
16-QAM скорость 3/4 TPC	7,0	7,7	3,00
16-QAM скорость 7/8 TPC	7,7	7,9	3,50
16-QAM скорость 3/4 с кодом Витерби/Рида-Соломона	7,5	8,0	2,73
16-QAM скорость 7/8 с кодом Витерби/Рида-Соломона	9,0	9,5	3,18

6.4. Современные спутниковые модемы

Бурное развитие систем спутниковой связи (ССС) привело к появлению на рынке широкой номенклатуры оборудования для них. Особенно разнообразен выбор спутниковых модемов. Эти устройства являются важным элементом земных станций (ЗС) спутниковой связи, так как от качества их работы зависят помехоустойчивость приема информации, занимаемая полоса частот, уровень помех в соседнем канале и т. д., а все это в конечном счете влияет на пропускную способность

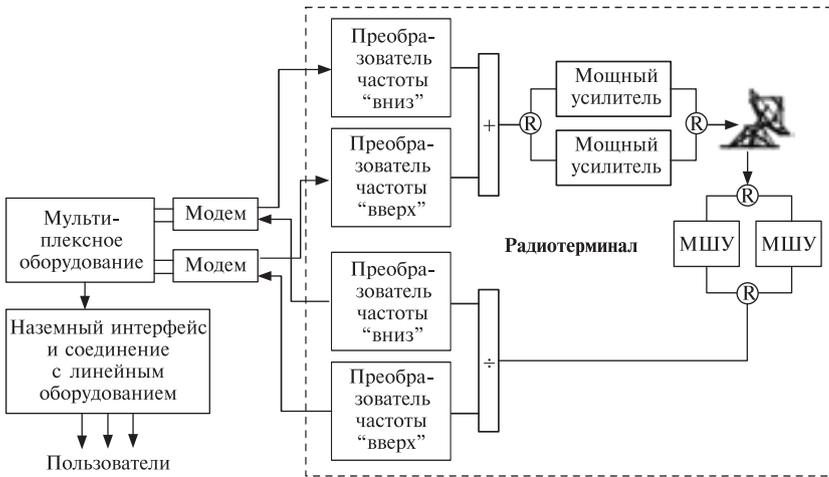


Рис. 6.17. Типовая схема подключения спутникового модема

всей системы спутниковой связи. Таким образом, оптимальный с точки зрения требований конкретной ССС выбор спутникового модема позволяет свести к минимуму потери пропускной способности.

Спутниковые модемы (далее просто модемы) предназначены для преобразования цифрового сигнала, поступающего от каналаобразующей аппаратуры ЗС (мультиплексоров, аппаратуры передачи данных, речепреобразующих устройств и т. д.), в модулированный радиосигнал на промежуточной частоте (ПЧ), обычно составляющей 70 ± 18 или 140 ± 36 МГц, и для обратного преобразования радиосигнала ПЧ в цифровой (рис. 6.17).

В состав современного модема входят следующие блоки: модулятор, демодулятор, кодер, декодер, интерфейс, контроллер управления и панель управления. Подлежащая передаче информация через блок интерфейса сначала подается на кодер, где происходят ее скремблирование и помехоустойчивое кодирование, а затем на модулятор, формирующий модулированный (ФМ или АФМ) сигнал.

В приемной части модема (демодуляторе и декодере) осуществляются когерентное детектирование принимаемого сигнала и выделение информации.

6.4.1. Основные параметры модемов

Выпускаемые в настоящее время модемы работают в различных диапазонах частот, имеют возможность перестройки и установки основных параметров, включая рабочую частоту, коэффициент усиления, выходную мощность, тип модуляции, скорость кодирования, тип

скремблирования, размеры буферов для данных и т. д. Величины этих параметров могут изменяться с малым шагом в широком диапазоне значений. Также следует отметить, что любой современный модем имеет систему встроенных процессоров с развитым программным обеспечением, позволяющую изменять конфигурацию модема либо с помощью его собственных органов управления и дисплея, либо через его порт контроля и управления. В последнем случае к этому порту подключается ПК или контроллер ЗС, обеспечивающий удаленное конфигурирование модемов в составе этой ЗС с центральной управляющей станции ССС. Это позволяет реализовать систему с ЗС, не требующими локального управления. Модемы имеют широкие возможности самодиагностики, самотестирования, могут хранить информацию обо всех изменениях в своей конфигурации, а также о сбоях и неполадках в работе.

По конструктивному исполнению представленные на рынке модемы можно разделить на следующие:

- отдельные законченные устройства, предназначенные для использования в составе любой ЗС;
- заменяемые устройства, интегрированные в какую-либо систему (например, модемы систем TIW Systems, Alcatel 7400ND и Hughes Network Systems), которые нельзя использовать в составе ЗС других производителей;
- подсистемы канальных блоков, объединяющие в своем составе, помимо основных элементов модема (см. рис. 6.17) речепреобразующее устройство (чаще всего вместе с экзозаградителем или эккомпенсатором) и модули для соединения с оконечным оборудованием (дифференциальную систему для преобразования четырехпроводной линии связи в двухпроводную, блоки поддержки различных типов сигнализации и т. д.).

По максимальной скорости передачи (а соответственно и приема) информации следует выделить три основные группы модемов:

1) низкоскоростные (максимальная скорость до 2048 Кбит/с), позволяющие организовать стандартные каналы на скоростях 16, 24, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 Кбит/с, например модемы SDM-100 фирмы EFDData, DMD2401 фирмы Radyne и др.;

2) среднескоростные (максимальная скорость от 2048 кбит/с до 8448 кбит/с), такие, как SDM-8000 фирмы EFDData, 9100 фирмы Hughes и др.;

3) высокоскоростные (максимальная скорость более 8448 бит/с). Их, например, выпускает фирма EFDData. Это модемы SDM-9000, SDM-70, SDM-140 и SDM-155, работающие на скоростях 51,840, 69,632,

139,264 и 155,52 Мбит/с соответственно. С их помощью можно передавать через ИСЗ трафик синхронной цифровой иерархии (SDH), в частности SDM-155 можно использовать для передачи синхронных потоков STM-1 со скоростью 155,52 Мбит/с. Для этих потоков МСЭ-Т стандартизировал сетевой интерфейс NNI. Он поддерживается как волоконно-оптическими, так и радиотехническими системами передачи данных, поэтому ССС могут использоваться для резервирования волоконно-оптических систем связи, передающих трафик SDH на большие расстояния, и для совместной работы с ними.

Повышение эффективности использования частотного ресурса и увеличение пропускной способности ССС обеспечивают многопозиционные методы модуляции сигнала, а именно ФМ-8, АФМ-16 и АФМ-64. Известно, чтобы применить эти методы, требуются довольно высокие энергетические потенциалы (на прием и передачу) ретрансляторов (РТР), однако современные технологии построения радиотехнических систем обеспечивают это.

Фирмой EFDData, например, был разработан ряд модемов (SDM-2020, SLM-8650, SDM-9000 и т.д.), реализующих модуляцию АФМ-16. Теоретически обоснована возможность передачи высокоскоростного цифрового потока STM-1 (155,52 Мбит/с) с помощью модуляции АФМ-64 через стандартный ствол РТР с полосой пропускания 36 МГц.

Для оценки эффективности использования частотного ресурса ССС при многопозиционной модуляции применяется коэффициент использования полосы частот, равный числу битов передаваемой полезной информации, приходящихся на один герц используемой для этого полосы частот. На сегодняшний день с помощью методов модуляции ФМ-4, ФМ-8, АФМ-16 и АФМ-64 реально обеспечиваются коэффициенты 1,75; 2,625; 3,5 и 5,25 бит/Гц соответственно.

При использовании в одной ЗС модемов, работающих на сильно различающихся скоростях передачи данных, часто возникает ситуация, когда менее скоростные из модемов не смогут принимать радиосигналы. Дело в том, что интегральный уровень мощности всех сигналов ствола, принимаемых ЗС и подаваемых на вход каждого из ее модемов, не должен превышать определенной величины (обычно составляющей $-10...0$ дБм), а режимы работы стволов РТР обычно выбираются так, чтобы обеспечить одинаковую спектральную плотность мощности ретранслируемых сигналов, поэтому уровни сигналов на входах демодуляторов модемов с относительно малой скоростью работы оказываются очень низкими — вне их динамического диапазона. Частным решением этой проблемы является установка дополнительных фильтров на входах ПЧ низкоскоростных модемов ЗС.

Часто с целью уменьшения стоимости ЗС модем применяется не только для выполнения своих основных функций, но и как формирователь сигнала наведения антенны ЗС. В качестве такого сигнала используется аналоговый или цифровой сигнал АРУ. Однако последний обычно формируется с некоторой задержкой, что неприемлемо для ряда систем наведения. В этом случае на ЗС целесообразно установить отдельный приемник наведения.

При работе ЗС в спутниковой системе с предоставлением каналов по требованию (СПКТ) важнейшей характеристикой ее модема является время вхождения в синхронизм. У современных модемов это время может быть довольно большим — до 10 с. Поэтому для СПКТ создан отдельный класс модемов — пакетные. Они передают данные короткими пакетами, занимая частотный канал только на время передачи этих пакетов. Благодаря использованию в пакете специальной преамбулы удается значительно снизить время вхождения модема в синхронизм. Так, у модема SDM-150 фирмы EFData это время составляет менее 30 мс при скорости обмена информацией 38 Кбит/с, а сам модем работает на прием и передачу в пакетном и непрерывном режимах. Несколько менее универсален модем CP101 фирмы ComStream, который работает в пакетном режиме и при приеме, и при передаче информации, а в непрерывном — лишь при ее передаче. Поэтому CP101 обычно устанавливают только на центральной станции ССС.

Следует отметить, что, кроме пакетных, существует еще одна группа специализированных модемов — с шумоподобными сигналами (ШПС). В ССС применение ШПС обусловлено необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости различных систем связи и повышения пропускной способности системы с помощью многостанционного доступа с кодовым разделением (МДКР).

В настоящее время оборудование для ССС, где используются широкополосные сигналы, на рынке почти не представлено. Поэтому при выборе модема ШПС возникают серьезные трудности, логическим завершением которых является в ряде случаев необходимость заказать разработку такого модема.

Одним из важных аспектов, влияющих на стоимость изготовления и эксплуатации ЗС, является надежность работы оборудования этой станции, в частности модемов. У современных модемов время наработки на отказ равно примерно 30 тыс. ч, что при отсутствии повышенных требований к надежности ЗС позволяет обходиться без их резервирования.

Цена модемов всегда является коммерческой тайной поставщика и покупающей их организации. Она зависит от многих факторов.

Однако можно сказать следующее: модемы со скоростью передачи данных от 9,6 до 2048 кбит/с стоят от 5 до 8 тыс. долл.

Основные производители. По числу производителей модемы составляют наиболее многочисленную часть оборудования ЗС (по сравнению с приемопередающими устройствами и антенными системами). На сегодняшний день самый крупный производитель модемов — американская фирма EFDData. Среди других производителей модемов следует назвать фирмы ComStream, Fairchild и Radyne.

Тенденции развития. Общими тенденциями развития модемов являются:

- рост универсальности устройств, что проявляется в поддержке многочисленных типов интерфейсов и разнообразии видов кодирования и модуляции сигналов, а также в постоянном расширении диапазона скоростей передачи информации;
- реализация возможности конфигурирования программным способом;
- уменьшение их массы и габаритных размеров.

В плане конструктивного исполнения модемов наблюдаются два новых направления. Первое — увеличение степени интеграции устройств, а именно размещение всех их функциональных узлов, кроме источника питания, на одной многослойной печатной плате. Пример таких модемов — модемы SDM-300 фирмы EFDData и DMD2400 фирмы Radyne.

Второе направление — построение модульных устройств — воплощено в модеме CM701 фирмы ComStream. Разработчики данного модема проанализировали причины бурного развития компьютерного бизнеса и пришли к выводу, что в этом не последнюю роль сыграло модульное построение компьютеров, дающее возможность пользователю самому определять конфигурацию своего компьютера, а при необходимости проводить его модернизацию. Ими была сделана попытка достичь успеха на рынке спутниковых модемов, осуществив перенос идеологии построения оборудования из области компьютеров в область этих устройств.

6.4.2. Сравнительный анализ современных образцов оборудования

Спутниковые модемы имеют ряд параметров, определяющих возможность их работы с наземным оборудованием и спутниковыми каналами и требующих грамотного выбора.

Частота ПЧ модема выбирается в зависимости от того, с каким спутниковым ретранслятором планируется работа. При работе ЗС СС

на одном ретрансляторе (стволе) с полосой до 36 МГц можно применять ПЧ 70+18 МГц, для ретрансляторов с полосой 72 МГц желательно использовать модемы с ПЧ 140+36 МГц. Для ПЧ 70/140 МГц в состав ЗС СС обязательно входят преобразователи частоты, а если работа ведется в нескольких стволах, то преобразователей должно быть несколько. В этом случае, а также для работы в составе VSAT станции, можно рекомендовать использование ПЧ L-диапазона. Это позволяет обойтись без преобразователей частоты и работать во всем спутниковом диапазоне. Другим параметром является тип модуляции. Это может быть BPSK, QPSK, 8-PSK или 16-QAM. Наилучшую помехозащищенность имеет модуляция BPSK, в то время как модуляция 16-QAM позволяет максимально экономно использовать арендуемую на спутнике полосу частот. На практике наиболее распространенной является модуляция QPSK. 16-QAM может использоваться только на ЗС СС с антеннами больших диаметров. Все чаще применяется модуляция 8-PSK, хотя это требует тщательного расчета спутниковой линии связи.

С целью повышения помехоустойчивости информация подвергается кодированию. Последовательный способ кодирования не нашел широкого применения. Наиболее распространенным является сверточное кодирование по Витерби или связка кодирования по Витерби с блочным кодированием по Риду–Соломону. Кодирование позволяет получить существенный выигрыш по помехозащищенности канала. В последнее время на смену кодированию по Витерби и Риду–Соломону пришло турбокодирование. Применение турбокодов позволяет еще более повысить помехозащищенность и уменьшить задержки, присущие прежним способам. Турбокодеки могут работать с любым типом модуляции.

В зависимости от того, с каким наземным оборудованием работает модем, он должен иметь соответствующий интерфейс. Это может быть RS422/449, RS232, V.35, G.703, DVB ASI, DVB SPI, а также такие расширенные возможности, как функция Drop&Insert и функция служебного канала (overhead).

Еще одной особенностью модемов последнего поколения является большой динамический диапазон входных сигналов, подстраивающийся под символьную скорость. Необходимо отметить способы управления модемом. Это может быть традиционное управление с передней панели, консольное управление по интерфейсу RS232 и дистанционное управление по интерфейсу RS485. В модемах последнего поколения появились Ethernet порты управления, а модемы поддерживают SNMP протокол. Существуют модемы, которые могут пос-

Таблица 6.3

Модель	Частота, МГц	Скорость передачи данных, Мбит/с	FEC	Модуляция
CDM-710	52...88; 104...176; 950...1950 (Tx); 950...2150 (Rx, для L-диапазона)	1...45 (S2), 1...30 (S)	DVB-S2, DVB-S, DVB-DSNG	QPSK, 8-PSK
CDM-700	52...88; 104...176; 950...1950	До 155, 1...64	TPC	QPSK, 8-PSK, 16-QAM, 64-QAM
CDM-Qx	50...90; 100...180	0,01...20	TPC Витерби	BPSK, QPSK, OQPSK, 8-PSK, 16-QAM
CDM-600L	950...1950	0,0024...20	LDPC, TPC Витерби, Последовательное прагматическое TCM-кодирование с кодом Рида-Соломона	BPSK, OQPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM
CDM-600 SDM-300L3	52...88; 104...176 950...1750	0,0024...20 0,0024...5	То же TPC Витерби, последовательное Рида-Соломона	То же BPSK, QPSK, OQPSK, 8-PSK
SDM-300A	50...180	0,0024...5	То же	То же
CDM-570L	950...1950	0,0024...5	-"-	-"-
CDM-570	50...90; 100...189	0,0024...5	-"-	-"-
CDD-564/564L	50...90; 100...180; 95...1950	0,016...5	TPC	QPSK, 8-PSK (опция), 16-QAM (опция)
CDM-550	52...88; 104...176	0,0024...2,048	TPC Витерби последовательное	BPSK, QPSK, OQPSK

тавляться без передних панелей и управляются через систему управления сетью. Это, например, модем ST2048 компании AdvantechAMT. Для дистанционного и локального управления модемами может применяться система управления AMFICOM-SAT.

При заказе спутникового модема необходимо указывать номинал ПЧ, скорость и тип интерфейса пользовательских данных, вид помехоустойчивого кодирования и требуемый способ модуляции. Параметры некоторых известных модемов приведены в табл. 6.3.

Модемы являются основной частью для построения информационных платформ на закрепленных каналах и в гибридных сетях спутниковой связи. Для построения ассиметричных высокоскоростных спутниковых каналов применяются модуляторы и демодуляторы. Раздельное применение этого оборудования позволяет строить экономич-

ные спутниковые сети. Наибольшее применение модуляторы и демодуляторы находят при построении станций спутникового вещания и передачи данных в стандарте DVB.

Вопросы к главе 6

1. Какие виды модуляции используются в спутниковых системах связи?
2. Каковы особенности фазовой модуляции?
3. Какие виды фазовой модуляции Вам известны?
4. Каковы особенности квадратурного формирования сигналов?
5. Каковы особенности модуляции с минимальным частотным сдвигом?
6. Что такое модуляция с решетчатым кодированием? Каковы ее особенности?
7. Какие методы помехоустойчивого кодирования Вам известны?
8. Какие методы кодирования используются для построения турбокодов?
9. Что такое каскадное кодирование?
10. В чем особенность сверточного кодирования?
11. Какова схема устройства перемежителя и деперемежителя?

7 Сокращение информационной избыточности

Во многих случаях информация, поступающая для последующей передачи в сети связи, обладает определенной информационной избыточностью. Для экономии информационного и энергетического ресурса информация определенным образом должна быть подготовлена, в том числе должна быть, по возможности, сокращена ее информационная избыточность, или, как далее она будет называться, просто избыточность. В данной главе рассматриваются возможные методы сокращения избыточности на различных этапах передачи информации. Прежде всего рассматриваются эффективные методы сокращения избыточности при кодировании текстовых сообщений, речевых сигналов, подвижных и неподвижных изображений, поступающих непосредственно от источников информации. Затем рассматриваются методы сокращения избыточности, имеющейся в сложных многоканальных мультиплексных сигналах, поступающих, в частном случае, на станции спутниковой связи от различного вида наземного оборудования. Подобную процедуру часто называют переуплотнением.

7.1. Классификация методов сжатия информационных сигналов

Сжатие — это процесс представления информации, содержащейся в сообщении, меньшим числом бит, включая сжатие без потерь и сжатие с потерями. В первом случае информация, восстановленная из сжатого сообщения, точно соответствует исходной ее копии, существовавшей до начала сжатия. Во втором случае информация после процедуры сжатия восстанавливается с некоторым приближением к исходной копии, т.е. допускается ее частичное искажение. Иногда процесс сжатия информации называется еще экономным кодированием. Некоторые потери информации при сжатии сообщения могут быть допущены лишь для сигналов при передаче речи и изображений. Методы сжатия с потерями учитывают особенности восприятия человеком аудио- и видеoinформации. Классификация методов сжатия приведена на рис. 7.1.

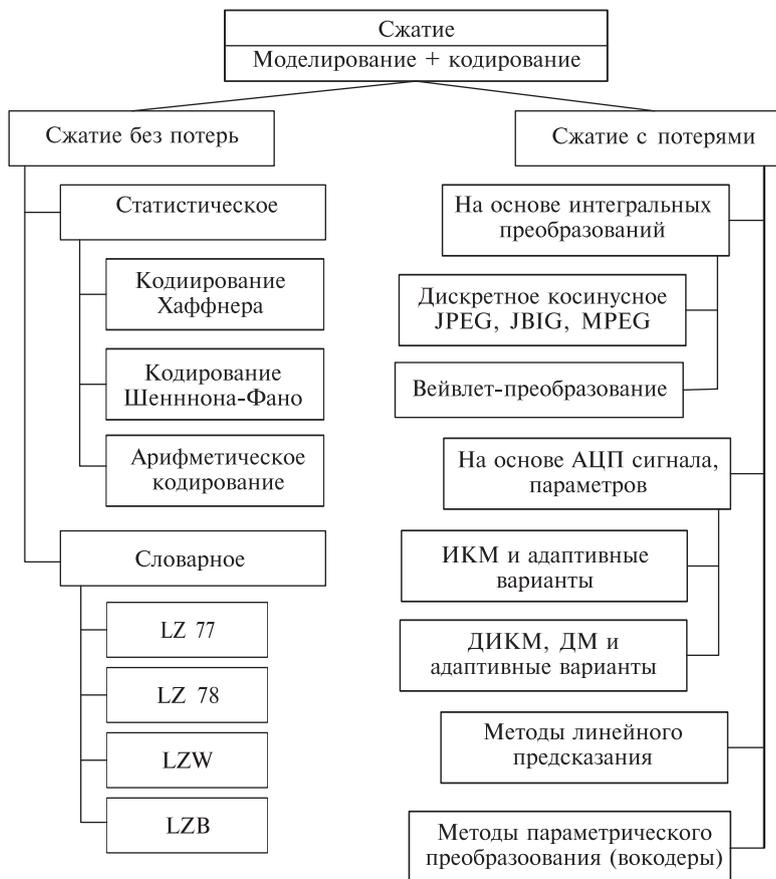


Рис. 7.1. Классификация методов сжатия (экономного кодирования)

Методы сжатия без потерь информации подразделяются на две группы, различающиеся способом формирования сжатого сообщения.

К первой группе относятся статистические методы сжатия, использующие оценку вероятности появления символов в алфавите источника кодируемого сообщения и, соответственно, энтропии данного сообщения. Статистические алгоритмы сжатия в явном виде содержат процедуру сжатия сообщения.

Сущность статистических методов состоит в представлении каждого символа из алфавита источника сообщений как можно меньшим числом бит, с учетом вероятности появления этого символа. Такие статистические методы сжатия информации называют также «энтро-

пийным кодированием». К этой группе относятся методы кодирования Шеннона, Фано, Хаффмана и арифметическое кодирование (АК).

Вторую группу методов сжатия без потерь образуют словарные методы, в которых сжатое сообщение формируется на основе статических либо динамических словарей, позволяющих экономно сформировать сообщение на основе встречающихся в словаре последовательностей символов. В основе всех современных словарных алгоритмов сжатия лежит идея измерения «продукционной сложности» конечных символьных последовательностей, выдвинутая А. Лемпелом и Я. Зивом в 1976 г.

Различают два семейства адаптивных словарных методов сжатия, основу которых составляют алгоритмы LZ77 и LZ78. Алгоритм LZ78 имеет множество модификаций, отличающихся размером и способом обновления словаря, способом кодирования символов и указателей. Самой известной и распространенной разновидностью этого алгоритма является алгоритм Лемпела — Зива — Велча (LZW).

Особенностями этого алгоритма являются простота его реализации и большая скорость сжатия по сравнению с любыми другими методами, поэтому он часто реализуется аппаратно, а один из его вариантов стандартизован в Рекомендации ITU-T V.42bis.

Методы сжатия с потерями информации. В зависимости от типа сигнала и природы его источника, будь то изображение (неподвижное и подвижное) или речь, различают следующие методы сжатия с потерями на основе:

- интегральных преобразований сигнала;
- аналого-цифрового преобразования сигнала;
- параметрического кодирования (вокодеры).

Для кодирования (сжатия) изображений наиболее часто применяют алгоритмы интегральных преобразований сигнала, позволяющие реализовать высокую степень сжатия при относительно незначительном снижении качества (четкости, цветовой палитры и т. п.) воспроизводимого изображения. Среди известных разновидностей интегральных преобразований сигнала на практике для целей сжатия получили распространение два вида преобразования сигнала: дискретное косинусное и вейвлет-преобразование.

7.2. Классификация и описание принципов действия современных речевых кодеков

Для упрощения описания принципов действия речевых кодеков их разделяют на три основных класса (рис. 7.2): кодеки формы (речевой волны), кодеки источника (вокодеры) и гибридные кодеки. Ес-



Рис. 7.2. Классификация речевых кодеков

тественно, кодеки формы волны (waveform codecs) порождают сравнительно высокоскоростной битовый поток и обеспечивают высокое качество речи. Кодеки источника речи (source codecs) обеспечивают, наоборот, низкоскоростное кодирование речи, и восстанавливаемая (синтезируемая) ими речь в определенной степени отличается от натуральной. Гибридные кодеки используют методы кодирования характерные как для вокодеров, так и для кодеков формы, обеспечивают

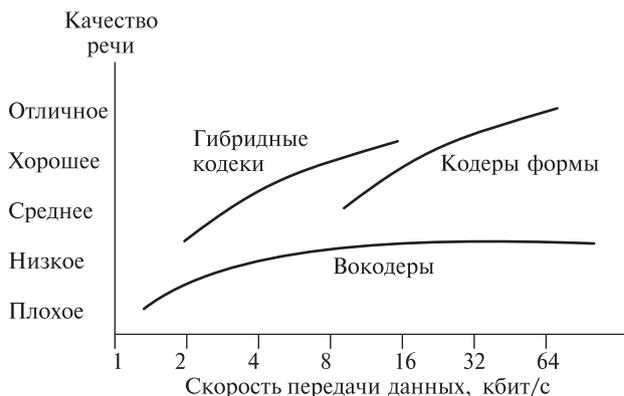


Рис. 7.3. Зависимость качества речи от скорости передачи информации для основных типов речевых кодеков

сравнительно высокое качество речи, реализуемое при промежуточных скоростях ее передачи.

Приведенная классификация речевых кодеков является наиболее распространенной в технической литературе, хотя и не считается общепринятой. Одни авторы некоторые из видов кодеков относят к вокодерам, в то время как другие авторы эти же виды относят к кодекам гибридного типа.

На рис. 7.3 представлена зависимость качества восстанавливаемой речи от скорости передачи информации в кбит/с для трех основных классов речевых кодеков.

7.2.1. Кодеры формы

Кодеками называются устройства для кодирования передаваемого сигнала и декодирования принимаемого. Часто оба эти технические устройства объединены в одном узле. Когда речь идет только о кодирующей части устройства, то их называют кодерами, декодирующую часть в этом случае называют декодерами.

Кодеры формы не используют каких-либо сведений о природе кодируемого сигнала и воспроизводят восстановленный сигнал в форме по возможности наиболее близкой к подлиннику. Это означает, что такие кодеры независимы от природы сигнала и должны хорошо работать не только с речевой информацией, но и с любыми сигналами передачи данных в полосе телефонного канала, например факсимильными аппаратами и телефонными модемами [20]. Самым простым примером кодера формы волны является импульсно-кодовая модуляция.

При импульсно-кодовой модуляции (ИКМ, Pulse Code Modulation, PCM) производится дискретизация и квантование входной речевой волны. Речевой сигнал ограничивается полосой до 4 кГц и дискретизируется с частотой 8 кГц. При кодировании речи в стандартных ИКМ кодерах используется квантование в логарифмической шкале. Такие квантователи обеспечивают в линии передачи практически постоянное отношение сигнал/шум для широкого разнообразия входных уровней, и на скорости восемь бит/отсчет (или 64 кбит/с) восстановленный сигнал почти не отличается по качеству от подлинника. Такие логарифмические квантователи были стандартизованы в начале 60-х годов и все еще широко используются сегодня. В Америке используется стандарт компандирования в виде μ -закона, в Европе используется А-закон компандирования.

Преобразование сигнала по А-закону задается следующим обра-

ЗОМ:

$$y = \begin{cases} y_{\max} \frac{A(|x|/x_{\max})}{1 + \ln A} \operatorname{sgn} x, & 0 \leq \frac{|x|}{x_{\max}} \leq \frac{1}{A}; \\ y_{\max} \frac{1 + \ln(A|x|/x_{\max})}{1 + \ln A} \operatorname{sgn} x, & \frac{1}{A} < \frac{|x|}{x_{\max}} < 1, \end{cases}$$

а компрессор с μ -законом использует соотношение

$$y = y_{\max} \frac{\ln[1 + \mu(|x|/x_{\max})]}{\ln(1 + \mu)} \operatorname{sgn} x,$$

где $\operatorname{sgn} x = \begin{cases} +1 & \text{для } x \geq 0; \\ -1 & \text{для } x < 0; \end{cases}$ A и μ — параметры компрессии.

При восстановлении сигнала по квантованным значениям для декомпрессии амплитуды сигнала используется преобразование (экспандирование), обратное логарифмическому закону. Стандарт кодирования по алгоритму ИКМ описывается рекомендацией ITU-T G.711, согласно которому значения параметров компрессии следует полагать равными: $A = 87,6$ и $\mu = 255$.

Преимуществами таких кодеков являются сравнительная простота технической реализации и малая задержка сигнала наряду с высоким качеством воспроизводимой речи. Однако такие устройства требуют сравнительно высокой битовой скорости и обладают восприимчивостью к ошибкам в канале связи.

Качество передачи при этом обычно оценивается по показателю отношения сигнал/шум квантования

$$SQR = 10 \lg \frac{E\{s^2(i\Delta)\}}{E\{g^2(i\Delta)\}},$$

где E — операция усреднения по времени; $s(i\Delta)$ — последовательность отсчетов речевого сигнала, взятых с интервалом $\Delta = 1/f_d$, $g(i\Delta)$ — шум квантования, $i = 1, 2, 3, \dots$ — номер отсчета. Для стандартных ИКМ систем отношение сигнал/шум квантования составляет около 35 дБ. Это соотношение используется для оценки пропускной способности цифрового телефонного канала, поскольку шум квантования является основным мешающим фактором при передаче сигналов по телефонному каналу.

Кодек ИКМ при скорости 64 кбит/с обычно используется как предварительное аналого-цифровое преобразование в эффективных кодеках речи.

В современных цифровых АТС сигналы всех телефонных каналов поступают на ИКМ кодеры и потоки 64 кбит/с объединяются с другими такими же потоками в мультиплексорах, а затем передаются в оптоволоконных сетях. В спутниковых системах передача речи

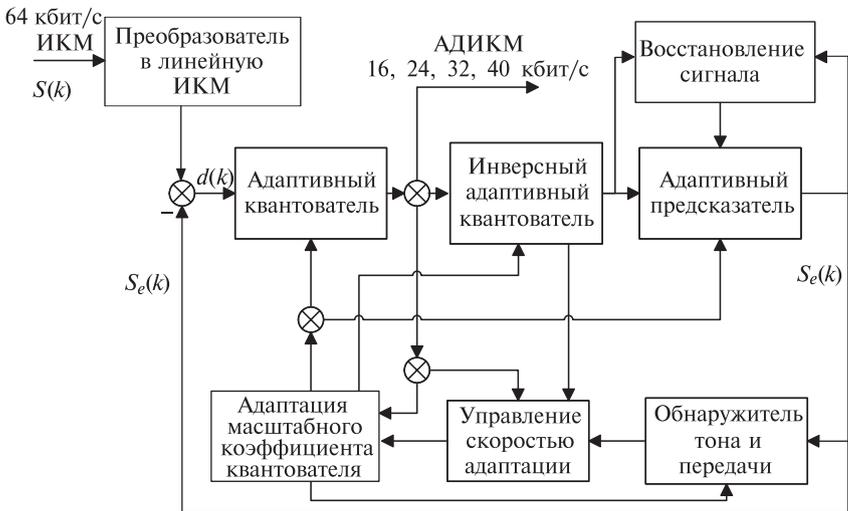


Рис. 7.4. Блок-схема кодера АДИКМ по рекомендации G.726

со скоростью 64 кбит/с в определенной степени расточительна, поэтому чаще всего ИКМ потоки перекодируются более эффективными кодерами в потоки с меньшими скоростями.

Адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция. Эффективные методы речевого кодирования основаны на стремлении предсказать значение следующего отсчета с учетом значений предшествующих отсчетов. Возможность осуществления такой процедуры основана на корреляции речевых отсчетов с учетом физиологических особенностей речепорождающего тракта и вибраций голосовых связок.

Если при этом прогноз эффективен, то сигнал ошибки между предсказанными отсчетами и фактическими значениями речевых отсчетов будет меньше, чем исходные речевые отсчеты. Следовательно, будет возможно квантовать этот сигнал ошибки с меньшим числом битов, чем исходный речевой сигнал. Такой прием лежит в основе способа дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ, Differential Pulse Code Modulation, DPCM). В этом случае квантуются отсчеты разности между исходным и предсказанным сигналами.

Классификационным признаком ДИКМ считается наличие блока линейного предсказания авторегрессионных последовательностей и многоуровневый квантователь.

Результаты действия таких кодеков еще более улучшаются, если прогноз и квантование выполняются адаптивно, т. е. их парамет-

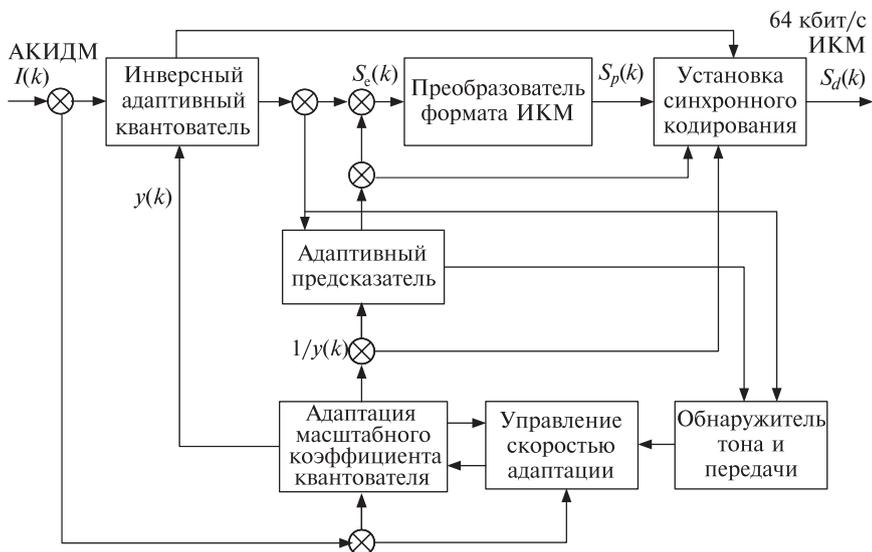


Рис. 7.5. Блок-схема декодера АДИКМ по рекомендации G.726

ры меняются с учетом характеристик кодируемой речи. Для этого предложен и реализован алгоритм кодирования, называемый адаптивной дифференциальной ИКМ-АДИКМ (Adaptive Differential PCM, ADPCM).

В середине 1980-х появился международный стандарт АДИКМ-кодека, действующий на скорости 32 кбит/с, который обеспечивал качество речи, близкое к качеству 64 кбит/с ИКМ-кодеку. В последующие годы были стандартизованы АДИКМ-кодеки (рекомендация G.722, G.726), действующие на скоростях 16, 24 и 40 кбит/с.

Упрощенные блок-схемы АДИКМ кодера и декодера представлены на рис. 7.4 и 7.5.

7.2.2. Параметрическое кодирование

Как было замечено выше, в спутниковых системах связи целесообразно использовать низкоскоростное кодирование при достаточном качестве передаваемого сигнала. Для понижения скорости при передаче кодированного сигнала необходимо, чтобы процедура кодирования складывалась из двух основных процессов:

- параметрического представления речевого сигнала с минимальным набором параметров, характеризующих источник возбуждения и акустический артикуляторный фильтр;
- дискретизации речевых параметров для их передачи по каналу связи с использованием минимальной емкости канала.

Для параметрического описания речи определяют параметры, описывающие передаточную функцию речевого тракта человека и функцию возбуждения. Этими параметрами, например, могут являться коэффициенты линейного предсказания [21].

Обычно для кодирования речи используют 8–10 параметров, вычисляемых на интервалах порядка 5...40 мс, кроме того, вычисляются параметр, характеризующий изменение амплитуды либо мощности сигнала, период основного тона речи, а также признак типа тон/шум/пауза, характеризующий способ возбуждения речевого сигнала.

Полученный набор параметров, оптимизированный по критерию точности и минимальной разрядности представления, передается в цифровом виде по каналу связи в реальном времени, а на приемном конце осуществляется синтез речевого сигнала по полученным данным.

Особенности вокодеров с линейным предсказанием. С начала 90 годов активно развивается подход на основе парадигмы «анализ методом синтеза» (linear prediction analysis by synthesis, LPAS). Суть этого метода состоит в том, что на передающем конце, помимо вычисления параметров кодируемой речи, осуществляются синтез этого же речевого сигнала с целью сравнения полученного при приеме декодированного сигнала с исходным, а затем оптимизация параметров описания речевого сигнала с целью минимизации сигнала возможной ошибки. При таком подходе в качестве сигнала используется последовательность импульсов возбуждения, генерируемая по специальному закону, либо сигналы из заранее подготовленного множества сигналов — кодовой книги (code-excited linear predictive, CELP). В результате оптимизации выбирается наилучшая последовательность импульсов возбуждения, обеспечивающая минимальную ошибку разности исходного и синтезированного сигналов.

Описание такой последовательности импульсов возбуждения (в виде амплитуды импульсов и длительности интервалов между ними либо номера набора сигналов из заранее известной кодовой книги) передается вместе с другими параметрами на приемный конец с целью декодирования-синтеза. При этом объем информации об особенностях сигнала может сократить общий объем передаваемого кода до 50 %.

Качество некоторых систем параметрического кодирования приближается к качеству сигнала с использованием АДИКМ. По мере развития такой подход позволил снизить информационную емкость речевого сигнала до 2400 бит/с, при сохранении не только разборчивости речи, но и дикторских особенностей.

Следует отметить, что для реализации эффективных алгоритмов кодирования речевых сигналов в реальном масштабе времени требуются специальные процессоры с производительностью в 15...20 миллионов операций в секунду.

Особенности современных многополосных вокодеров. Наряду с моделями кодеров с линейным предсказанием в последнее время для устранения избыточности нашли применение вокодеры с многополосным возбуждением (Multi Band Excitation, МВЕ) различных модификаций.

Среди наиболее распространенных алгоритмов, базирующихся на модели МВЕ, следует назвать:

- IMBE (Improved Multi Band Excitation) 6,4 кбит/с, разработанный DVSI (Digital Voice System Inc.) и принятый в качестве стандарта для Inmarsat-M в 1990 г.;
- AMBE (Advanced Multi Band Excitation) 4,8 кбит/с, принятый в качестве стандарта для Inmarsat-mini-M в 1994 г.

МВЕ-модель появилась сравнительно недавно (разработана Massachusetts Institute of Technology, USA) и имеет гораздо меньшее распространение, чем ее «конкуренты» — модели линейного предсказания со всевозможными видами возбуждения.

Основное отличие МВЕ-речевой модели от других — в подходе к формированию сигнала возбуждения. Спектр возбуждающего сигнала делится на неперекрывающиеся отдельные частотные полосы, и окончательное решение «вокализованность/невокализованность» принимается в каждой такой полосе отдельно.

Таким образом, сигнал возбуждения состоит одновременно и из невокализованных частотных компонент, и из вокализованных. Это позволяет увеличить степень свободы в моделировании возбуждения и получить более высокое качество синтезированной речи. Одновременно это обеспечивает лучшую устойчивость (стойкость) по отношению к воздействию фоновых шумов. Кодеки МВЕ нашли применение и хорошо зарекомендовали себя в системах мобильной спутниковой связи.

7.2.3. Параметры цифровых потоков современных систем кодирования речи

В подавляющем большинстве современных вокодеров обработка речи проводится по сегментам длительностью 10...30 мс. После вычисления требуемых параметров определяются коэффициенты, особо важные для речеобразования, которые кодируются помехоустойчивым кодом с добавлением синхронизирующей информации. В результате этого сегмент речи отображается как составное кодовое слово из

определенного количества битов. Поскольку сегменты следуют один за другим, то и кодовые слова так же следуют друг за другом и образуют некоторую квазипериодическую структуру. Длина кодового слова определяет период, который принято называть кадром, и длина кадра является эффективным идентификационным признаком вокодеров.

В табл. 7.1 приводятся краткие сводные данные о параметрах наиболее известных и стандартизованных вокодерных алгоритмов и кодеков формы.

Расшифровка названий некоторых вокодеров приведена ниже.

CELP — Code-Excited Line Prediction — линейное предсказание с кодовым возбуждением;

RELP — Residual-Excited Line Prediction — линейное предсказание с возбуждением (M-RELP — Modified RELP — модифицированное RELP);

ACELP — Algebraic Code-Excited Line Prediction — линейное предсказание с алгебраическим кодовым возбуждением;

E-CELP — Expanded Code-Excited Line Prediction — линейное предсказание с алгебраическим расширенным кодовым возбуждением;

CS-ACELP — Conjugate Structure Code Excited Line Prediction — линейное предсказание с алгебраическим кодовым возбуждением сопряженной структуры;

LD-CELP — Low-Delay Code Excited Line Prediction — линейное предсказание с кодовым возбуждением и малой задержкой;

LM-CELP — Low-Memory Code Excited Line Prediction — линейное предсказание с кодовым возбуждением и малым использованием памяти;

MR-CELP — Memory-Reduced Code Excited Line Prediction — линейное предсказание с кодовым возбуждением и укороченной памятью предсказателя;

P-CELP — Predictive Code Excited Line Prediction — линейное предсказание с предиктивным (предсказывающим) кодовым возбуждением;

VSELP - Vector Sum Excited Linear Predictive, линейное предсказание с возбуждением векторной суммой;

RPE-LTP — Regular Pulse Excitation with Long-Time Predictor — регулярное (много)импульсное возбуждение с долговременным предсказателем.

MP-MLQ — Multi-Pulse (excitation) with Maximum Likelihood Quantization — многоимпульсное возбуждение с квантованием с максимальным правдоподобием;

QCELP — Qualcomm CELP — алгоритм CELP фирмы Qualcomm;

Таблица 7.1

Стандарт	Скорость, кбит/с	Длина кадра, бит
FS.1015 (LPC10)	2,4	54
FS.1016 (CELP)	4,8/7,2/9,6	144/216/288
MELP	2,4/1,7	54/34
DSPSE (Low Memory CELP)	4,875/7,458	117/179
DSPSE (Low Delay CELP)	8,0	н/д
DSPSE (Multi Rate Voice Wave)	4,8/6,4/7,2/8,0/ 9,6/13,2	120/160/184/200/ 240/336
DSPSE (Multi Rate CELP)	4,8/7,2/9,6	120/144/192
MBE-LPC	1,2/2,4	н/д
G.728 (LDCELP)	12,8/14,4/16	8/9/10
G.729 (CS-ACELP)	8	80
Inmarsat B (ME-LPC)	9,6/16	192/320
Inmarsat M (IMBE)	6,4 (4,15+2,25fec)	128 (83+45fec)
Inmarsat-Mini-M (AMBE)	4,8 (3,6+1,2fec)	96
G.723 (ACELP/MP-MLQ)	5,27/6,33	158/192
G.723,1 (A-CELP)	5,3/6,3	158/189
G.723 (ADPCM)?	24/40	—
IS-54 (VSELP)	7,95	159
IS-136	7,95	159
TIA IS-641 ACELP	7,4	160
TIA IS-96 (QCELP)	1/2/4/8/ 13,0	160 260
MRELP	9,6	н/д
GSM Full Rate	13,1	260
GSM Half Rate	5,6	112
ACELP (Tetra)	4,8	137
IMBE (APCO-25)	7,2(4,4+2,8)	144 (88+56)
GMR (Thuraya)	5,2(4,0+1,2)	104 (80+24)
CVSD	8-32	—
G.711	64/56/48	—
G.722	64/56/48	—
G.722,1	16/24/32	—
G.721 (ADPCM)	32	—
G.727 (Embedded ADPCM)	16/24/32/40	—
G.726 (VBR-ADPCM)	16/24/32/40	—
GSM-EFR (ACELP)	12,2	н/д
GSM-AMR (AMR-CELP)	6,5-14,0 4,5-8,0	н/д
ETSI GSM (Full-Rate RPE-LTP)	13,0	272
Skyphone (BT-MPLPC)	8,9	н/д
SX7300P	7,3	н/д
JDC Japanese RCR STD-27 (Full-Rate VSELP)	6,7	н/д
JDC Japanese RCR STD-27 (Half-Rate PSI-CELP)	5,6 (3,45 +2,15fec)	н/д
SecTel 1500 (MRELP)	2,4/9,6	54/216

IMBE (AMBE) — Improved (Advanced) Multi-Band Excitation — улучшенные алгоритмы с многополосным возбуждением;

ATC — Adaptive Transform Coding — кодирование с адаптивным преобразованием;

STC — Sinusoidal Transform Coding — кодирование с преобразованием синусоид.

7.3. Основные стандарты компрессии цифрового видео

Спутниковые линии связи широко применяются для передачи различного вида цифровой видеоинформации.

Процесс стандартизации в сфере компрессии цифрового видео идет под руководством двух организаций: ISO (International Standards Organization) и ITU (International Telecommunications Union).

Большинство стандартов компрессии видео базируется на принципах стандарта H.261, разработанных МСЭ. Несколько лет спустя был представлен развивающий положения документа H.261 существенно улучшенный стандарт H.263.

В 1995 г. после завершения разработки стандарта сжатия для передачи видео H.263 группа экспертов по кодированию видео (Video Coding Experts Group — VCEG) МСЭ-Т начала работать над долгосрочным проектом по разработке нового стандарта для визуальных коммуникаций с малой скоростью потока. В результате этого появился вариант стандарта H.26L выполняющий сжатие цифровых видеосигналов гораздо эффективнее, чем это осуществляли предыдущие стандарты.

Параллельно с этими работами группа экспертов ISO Motion Picture Experts Group (ISO-MPEG) представила стандарт MPEG-1, предназначенный для использования в сфере PC/CD (компьютеры и компакт-диски). Последующий за ним стандарт MPEG-2 был предназначен для сферы вещания с применением изображения высокой степени разрешения при скоростях потоков от средних до высоких. В дополнение к кодированию видео сигнала стандарт MPEG-2 включает в себя также кодирование звука и транспортный уровень для одновременной передачи нескольких программ. Сегодня стандарт MPEG-2 является для вещания основным и широко применяется в спутниковой связи в роли транспортной системы для передачи данных (Интернет). На рис. 7.6 представлена хронология развития стандартов сжатия для цифрового видео.

Стандарт MPEG-1 (1992 г.) предназначен для записи видеоданных на жесткие компакт-диски типа CD-ROM и передачи цифровых ТВ изображений по сравнительно низкоскоростным каналам связи (скорость цифрового потока до 1...3 Мбит/с). При этом используется стандарт развертки с четкостью в 4 раза меньшей, чем в вещательном телевидении, а именно 288 активных строк в ТВ кадре и 352 отсчета в активной части ТВ строки. Субъективная оценка качества ТВ изображения в зависимости от скорости передачи данных

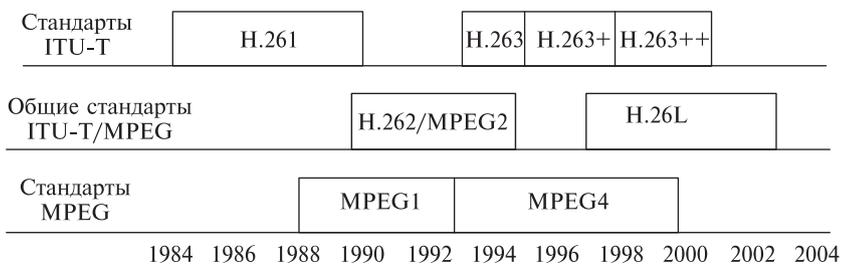


Рис. 7.6. Хронология стандартов MPEG

показывает, что стандарт MPEG-1 можно эффективно использовать при кодировании видеоданных до скорости 3,5 Мбит/с, поскольку в интервале скоростей от 1,5 до 3,5 Мбит/с увеличение скорости передачи видеоданных сопровождается адекватным улучшением качества изображения. Однако дальнейшее повышение скорости передачи не ведет к сколько-нибудь заметному улучшению качества. При скорости передачи видеоданных, превышающей 3,5 Мбит/с, лучшее качество изображения обеспечивается при кодировании по стандарту MPEG-2, работы над которым начались в 1990 г. Разработанный специально для кодирования ТВ сигналов вещательного телевидения этот стандарт сжатия позволяет получить высокую четкость ТВ изображения, соответствующую Рекомендации 601 МККР в 576 активных строк в кадре и 720 отсчетов в активной части строки. Этот стандарт предназначен для каналов связи со скоростью передачи данных 3...10 Мбит/с для обычного телевизионного стандарта вещания и 15...30 Мбит/с для телевидения высокой четкости (ТВЧ). Проект стандарта MPEG-2 вышел в начале 1994 г., а уже в 1995 г. были выпущены последние документы. В стандарте обеспечивается совместимость типа «вперед», т. е. MPEG-2 декодер может при необходимости декодировать поток данных стандарта MPEG-1.

Специально для кодирования сигналов ТВЧ началась разработка стандарта MPEG-3, однако после двухлетней работы было принято решение о расширении возможностей MPEG-2 и в него были включены алгоритмы для кодирования изображения ТВЧ. После этого MPEG-3 как самостоятельный стандарт перестал использоваться.

На следующем этапе развития стандарта MPEG появился вариант MPEG-4, работа над которым началась в 1993 г. Стандарт MPEG-4 предназначен для передачи видеоданных в низкоскоростных системах мультимедиа и обеспечения работы видеоконференций при связи по цифровым телефонным каналам. При использовании стандарта развертки с четкостью, в 4 раза меньшей, чем в стандарте MPEG-1, а

именно 144 активных строки в кадре и 176 отсчетов в активной части строки, кодек MPEG-4 позволяет снизить скорость цифрового потока до 64 Кбит/с.

Согласно экспертным оценкам для получения изображения студийного качества, соответствующего Рекомендации 601 МККР, необходимо передавать видеоданные со скоростью около 9 Мбит/с, тогда декодированный видеосигнал будет пригоден для последующей цифровой обработки. Для получения качества изображения, равного качеству изображения на экране бытового телевизора, достаточна скорость передачи около 6 Мбит/с. Однако в этом случае декодированный видеосигнал малоприспособен для последующей обработки и повторного кодирования с информационным сжатием.

Что касается передачи звуковых данных, то в настоящее время общепринятым эталоном высшего качества звука является качество, получаемое при воспроизведении компакт-дисков. Поэтому в стандарте MPEG-2 предполагается, что в системах цифрового ТВ вещания качество звукового сопровождения в формате стерео субъективно не должно отличаться от звука компакт-диска. Это условие выполняется для принятой в стандарте MPEG-2 системы информационного сжатия звуковых данных MUSICAM при скорости передачи по 128 Кбит/с в каждом моноканале звукового сопровождения. Таким образом, для самого низкого уровня — двухканального стереофонического звукового сопровождения — потребуется скорость передачи цифровых данных, равная $128 \times 2 = 256$ кбит/с.

7.3.1. Краткое описание алгоритма сжатия видеосигнала в стандарте MPEG-2

Стандарт MPEG-2 сам по себе не регламентирует методы сжатия, а только определяет, как должен выглядеть битовый поток кодированного видеосигнала. Поэтому конкретные алгоритмы стандарта являются коммерческой тайной фирм-производителей оборудования. Однако существуют общие принципы сжатия цифрового видеосигнала, и это позволяет представить процесс сжатия в виде ряда последовательных операций (рис. 7.7).

Главное статистическое свойство, на котором основана аппаратура сжатия, — межэлементная корреляция, предполагающая коррелированность между собой последовательных кадров видеоданных.

Значения отдельных пикселей изображения при этом могут быть предсказаны по значениям ближайших пикселей внутри одного кадра с применением аппаратуры внутрикадрового кодирования, а также по значениям пикселей, расположенных в ближайших кадрах, с испо-

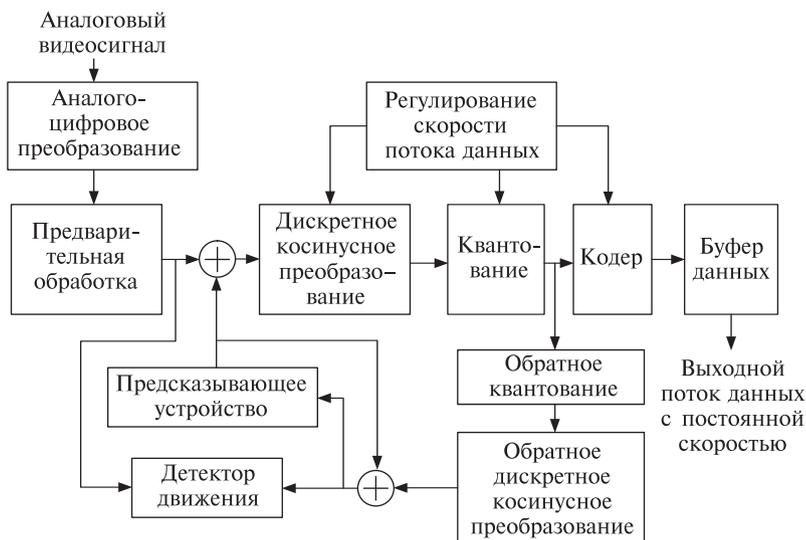


Рис. 7.7. Обобщенное представление метода сжатия телевизионного сигнала в стандарте MPEG-2

льзованием аппаратуры межкадрового кодирования и компенсацией перемещения объектов в кадре.

В стандарте MPEG-2 используются три вида кодирования: внутрикадровое, межкадровое «вперед» с компенсацией движения, межкадровое двунаправленное с компенсацией движения.

В соответствии с профилями и уровнями, определенными в MPEG-2, существует большое число вариантов систем, соответствующих требованиям стандарта. Поскольку кодер в стандарте не определен, то допускаются различные варианты его реализации. Кроме того, декодер может улучшать качество видеосигнала различными способами, не приводящими к заметным отклонениям от опубликованного стандарта.

Системная часть стандарта MPEG-2 регламентирует порядок формирования единого (транспортного) потока данных из множества элементарных потоков и определяет последовательность их кодирования. Обобщенная структурная схема формирования транспортного потока представлена на рис. 7.8. После сжатия звуковой и видеoinформации на выходе соответствующих кодеров формируются элементарные потоки (Elementary Stream, ES).

Так несколько элементарных потоков поступают на вход формирователя пакетированного элементарного потока (Packetized Elementary Stream, PES). В результате на его выходе образуется пакетиро-

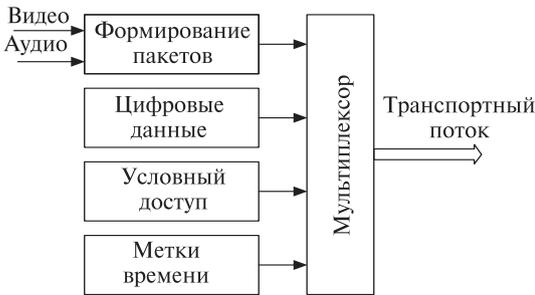


Рис. 7.8. Структурная схема формирования транспортного потока MPEG-2

ванный элементарный поток одного телевизионного канала, который может состоять из одного элементарного потока видеоданных и нескольких элементарных потоков звукового сопровождения, из которых формируется транспортный поток.

Кроме PES, на мультиплексор поступают также сигналы синхронизации и различные цифровые данные, например поток интернет-трафика TCP/IP.

7.3.2. Требования к стандарту видеокомпрессии нового поколения

Принятие стандарта видеокомпрессии MPEG-2 и соответствующей технологии сжатия видео определило успех цифрового телевизионного вещания в течение последующих лет. Эта технология обеспечила резкий скачок роста числа каналов, вещание которых стало экономически оправданным.

За последние годы были достигнуты улучшения (вне рамок стандарта) за счет применения меньших скоростей потока. Это реализовано за счет предварительной обработки, шумопонижения и технологии коррекции ошибок за счет предсказания и двойного прохода (look ahead/dual pass).

Существует мнение, что нынешний стандарт практически достиг предела в достижении степени сжатия и поэтому не позволяет обеспечить высококачественную передачу видео на скоростях менее 1 Мбит/с. Однако, поскольку большинство используемых ныне абонентских приставок (set-top-boxes, STB) поддерживают стандарт MPEG-2, он останется в течение нескольких последующих лет широко распространенным.

Ограничение полосы пропускания всегда было слабым местом сферы передачи цифрового вещания. Необходимость более широкой полосы всегда была актуальной как для сферы доставки конечному потребителю (Direct to Home, DTH), так и для сферы распределения и доставки сигнала (Contribution and Distribution, C&D).

Сфера DTH предполагает передачу контента от вещательной станции (головной станции) непосредственно в дом потребителю (подписчику). Эта процедура функционально делится на различные системы связи: спутниковую, кабельную и телекоммуникационную. Каждый из этих сегментов по-своему откликается на применение стандартов компрессии видео нового поколения. Так, спутниковый сегмент DTH требует более эффективного использования полосы пропускания спутников, что обусловлено высокой стоимостью транспондеров. Новый стандарт компрессии позволил бы существенно уменьшить необходимую ширину полосы пропускания, а значит, существенно снизить общие расходы на предоставление каждой из услуг при использовании полосы для каждого абонента в среднем менее 1 Мбит/с.

7.4. Сокращение избыточности при передаче многоканальных цифровых телефонных потоков

7.4.1. Оборудование динамического мультиплексирования

При передаче многоканальных цифровых телефонных потоков в спутниковых системах связи применяется специальное оборудование, уменьшающее требуемую групповую скорость.

Сокращение избыточности в этом случае может достигаться с помощью динамического мультиплексирования каналов, цифровой интерполяции речи (ЦИР), низкоскоростного кодирования речи и передачи факсимильных сигналов в демодулированном виде при помощи оборудования динамического мультиплексирования (Digital Circuit Multiplication Equipment, DCME) [22]. Цифровая интерполяция речи осуществляется подключением входных каналов к каналам передачи только на тот промежуток времени, когда они активны и по ним передается речь или данные речевого диапазона. Поскольку при обычных телефонных разговорах одно направление передачи активно только в течении 30...40 % времени, при большом числе входных каналов статистика распределения речи и пауз позволяет существенно снизить число используемых каналов передачи. Низкоскоростное кодирование предполагает перекодирование потоков ИКМ 64 кбит/с в потоки АДИКМ 32 кбит/с либо в вокодерные потоки со скоростями вплоть до 8 кбит/с. Это позволяет обеспечить связь до 216–360 наземных линий на одной цифровой несущей со скоростью 2048 кбит/с.

Оборудование цифрового уплотнения каналов выполняет следующие функции:

- обнаруживает активность сигналов в линиях, подлежащих уплотнению;



Рис. 7.9. Обобщенная схема формирования потока в оборудовании ЦИР-АДИКМ

- классифицирует сигналы и их осуществляет их преобразование в соответствие с видом сигнала;
- осуществляет поиск свободного несущего канала или образование перегрузочного канала для передачи активного входного сигнала;
- регулирует скорость передачи речевых сигналов и АДИКМ при формировании перегрузочных каналов.

Обобщенная схема формирования сигнала в различных типах оборудования цифрового уплотнения представлена на рис. 7.9.

Канал управления в любой системе DCME должен обеспечить цикловую синхронизацию аппаратуры и помехоустойчивое кодирование передаваемых сообщений для защиты от ошибок, возникающих при передаче по спутниковой линии.

В составе передаваемых по каналу управления сообщений в любой системе DCME имеются функциональные блоки следующего назначения:

- закрепление соединительного канала за несущим (с указанием при необходимости типа несущего канала);
- определение уровня шума занятого канала в паузах;
- определение вида сигнала, передаваемого в несущем канале;
- динамическое управление нагрузкой;
- аварийная информация (как системная, так и входных ИКМ линий);
- закрепление служебного канала (возможно, нескольких) за несущим;
- закрепление несущего канала для тестирования (самодиагностики) и информации о ее результатах.

В зависимости от вида сигнала (речь, факсимиле, модемный сигнал) имеются три различных возможности их обработки. Так, при передаче речевых сигналов используются три процесса: цифровая интерполяция речи, преобразование ИКМ выборок сигнала (8 битов) в отсчеты АДИКМ, состоящие из 4, 3 или 2 битов, и, наконец, регулирование скорости передачи речевого сигнала, т. е. числа битов в отсчетах АДИКМ. Уменьшение количества битов, выделяемых на АДИКМ отсчет, повышает пропускную способность системы за счет ухудшения качества каналов и может быть использовано, когда число активных каналов превышает число свободных несущих каналов скорости 32 кбит/с. Освободившиеся младшие разряды несущих каналов в таком случае используются для формирования дополнительных перегруженных каналов. Для уменьшения негативных последствий режима перегрузки предусмотрена процедура постоянной смены каналов, из которых заимствуются свободные биты для дополнительных каналов.

Необходимость различения модемных/факсимильных и речевых сигналов вызвана не только невозможностью эффективного использования интерполяции сигналов первого вида, но и более жесткими требованиями к качеству каналов для их передачи, вследствие чего виды АДИКМ, применяемые для передачи речевых сигналов и сигналов данных, различаются. Рекомендации МСЭ G.726 или более ранняя версия G.723 определяют, что в зависимости от скорости модемных сигналов (до 4800 и более 4800 бит/с) необходимо использовать режимы АДИКМ с 4 и 5 битами на отсчет (соответственно скорости 32 и 40 кбит/с). Вариант с применением АДИКМ 40 кбит/с (G.726) предусмотрен также стандартом IESS-501. Классификаторы сигналов определяют наличие модемных и факсимильных сигналов, как правило, по спектральным признакам и характерному тональному сигналу частоты.

7.4.2. Статистическое мультиплексирование РСМЕ

Появление высокоскоростных линий связи с малым коэффициентом ошибок и высокоскоростных коммутаторов, сокративших время задержки пакетов в сети, позволило применить на практике метод быстрой коммутации пакетов (БКП) при передаче информации различных видов электросвязи в интегрированном виде.

Метод БКП характеризуется применением высоких скоростей передачи пакетов при использовании упрощенных протоколов. Коммутатор БКП передает пакеты по виртуальным каналам и действует как обычный маршрутизатор без восстановления путем обратных запросов потерянных пакетов или тех пакетов, в которых были обнаружены

ошибки. Процедуры защиты от ошибок и контроля потоков возлагаются на протоколы верхних уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМ ВОС).

Рекомендация ITU-T G.764 содержит описание протокола передачи речи в пакетном режиме, а G.765 стандартизирует оборудование мультимплексирования с коммутацией пакетов (Packetized Circuit Multiplication Equipment, PCME).

В соответствии с требованиями этих Рекомендаций два и более комплекта оборудования PCME образуют систему мультимплексирования с коммутацией пакетов (Packetized Circuit Multiplication System, PCMS), на вход которой поступает информационный трафик с сигналами различных видов. Пакеты при этом формируются с использованием аналого-цифрового преобразования и низкоскоростного кодирования и передаются через общую сеть или по отдельному каналу связи, обеспечивая тем самым более высокую эффективность, чем при традиционной коммутации каналов. После этого пакеты данных восстанавливаются в исходном виде в точке приема.

Для сжатия и повышения пропускной способности линий связи используется распознавание сигналов на канально-ориентированной стороне оконечного узла PCME. Это распознавание происходит на основе оценки полосы частот, занимаемой входным сигналом внутри стандартного телефонного канала (СТК) и его уровня. В зависимости от результатов оценки выбирается метод обработки сигнала перед его отправкой в виде пакетов. Для передачи речи и внутриполосных данных используются различные методы кодирования, а факсимильные сигналы передаются в демодулированном (цифровом) виде.

7.5. Сжатие заголовков TCP/IP

При передаче данных по каналу связи большая часть полей в заголовке TCP/IP (рис. 7.10) имеет фиксированное значение для каждого соединения, причем длина стандартного заголовка TCP/IP составляет 40 байтов. Для обеспечения интерактивной работы приложений необходимо обеспечить передачу пакетов данных, сопровождаемых заголовками TCP/IP в обоих направлениях, а это приводит к увеличению времени отклика приложений. Длина кадра TCP/IP ограничена размером 65535 байтов, но все хосты и шлюзы сети, как правило, работают с целью уменьшения влияния ошибок в канале на пропускную способность системы связи с пакетами длиной до 576 байтов. Передача полных заголовков протокола TCP/IP приводит к значительному снижению пропускной способности канала.

Байт 0	8		16				24			
0	Версия протокола	Длина заголовка	Тип сервиса				Общая длина			
4	Идентификатор пакета						D	M	Смещение фрагмента	
8	Время жизни		Протокол				F	F		
12	Адрес источника									
16	Адрес приемника									
20	Порт источника						Порт приемника			
24	Последовательный номер кадра									
28	Номер подтвержденного кадра									
32	Смещение данных		urg	ack	psh	rst	syn	fin	Длина данных для приема	
36	Контрольная сумма						Указатель срочности			
40	Байт данных 1		Байт данных 2				Байт данных 3			

Рис. 7.10. Формат заголовка пакета TCP/IP

Эти особенности привели к широкому применению на низкоскоростных линиях связи с небольшим числом абонентов протоколов сжатия заголовков TCP/IP, описанных в стандарте RFC 1144 [23].

Наличие в заголовке пакета TCP/IP постоянных полей (они затенены на рис. 7.10) во время соединения с удаленным абонентом позволяет значительно сократить размер сжатого заголовка. Так как большинство остальных полей представляют собой монотонно увеличивающиеся счетчики, для их описания удобно использовать инкрементный алгоритм и передавать только разность текущего и предыдущего значений. При передаче сжатых заголовков TCP/IP используется модель преобразования заголовков пакетов, изображенная на рис. 7.11.

Блок фрагментации (преобразования размера пакета данных) и контроля ошибок обеспечивает устранение ошибок в процессе передачи пакетов по коммутируемому каналу связи. Так как алгоритмы сжатия кодируют величины полей текущего заголовка относительно значений полей предыдущего заголовка, блок фрагментации не должен изменять порядок поступления пакетов данных на декомпрессор.

В линии могут передаваться как пакеты со сжатыми заголовками (формат заголовка изображен на рис. 7.12), так и имеющие полный заголовок TCP/IP.

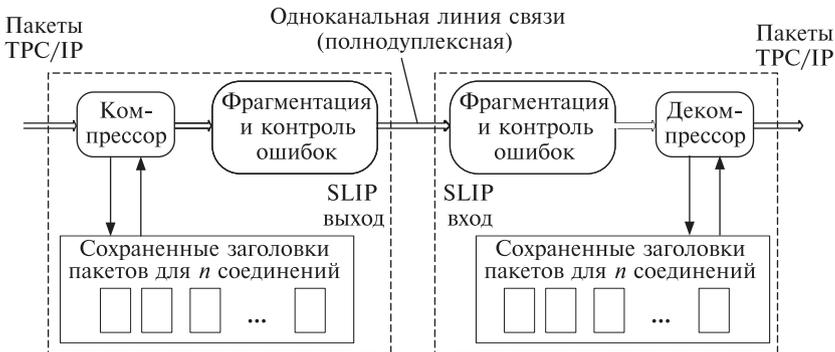


Рис. 7.11. Модель преобразования заголовков TCP/IP

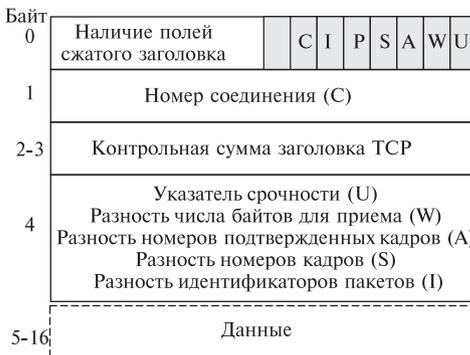


Рис. 7.12. Формат сжатого заголовка TCP/IP

Если разность значений для одного из кодируемых полей отрицательна или больше чем 65535, то передается несжатый заголовок TCP/IP. Значения полей в диапазоне от 1 до 255 представляются одним байтом, а в диапазоне от 256 до 65535 и нулевое значение — тремя байтами, первый из которых нулевой. Например, десятичное число 15 кодируется как шестнадцатеричное значение 0f, 255 — ff, 65534 — 00ffe, и ноль — 000000.

Первый байт заголовка пакета позволяет определить, передается сжатый (бит C равен единице) или несжатый заголовок TCP/IP, и идентифицирует наличие в сжатом заголовке переменных полей (биты I, S, A, W, U). Бит P является копией флага PSN из заголовка TCP.

Применение сжатия заголовков TCP/IP позволяет существенно уменьшить используемую длину пакета данных, при этом эффективность использования линии (часть пропускной способности канала, отводимая для передачи данных пользователя) незначительно уменьшается (рис. 7.13, сплошная линия) в отличие от стандартного про-

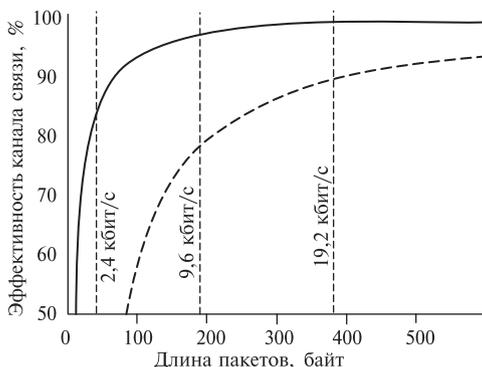


Рис. 7.13. Зависимость эффективности использования пропускной способности канала от длины пакета данных

токола TCP/IP (рис. 7.13, пунктирная линия). В низкоскоростных коммутируемых линиях связи вероятность искажения данных велика, поэтому сокращение длины пакета данных позволяет уменьшить количество повторно передаваемых из-за ошибок пакетов и часть пропускной способности канала, задействованную на эту повторную передачу, что реально увеличивает пропускную способность канала передачи данных.

Вертикальные линии на графиках рис. 7.13 определяют максимальную длину пакета, для которой при обозначенной скорости передачи данных достигается время отклика интерактивных систем связи, равное 0,2 с.

Вопросы к главе 7

1. С какой целью сокращается информационная избыточность сообщения?
2. Каким образом можно сократить избыточность сообщения?
3. Что такое «сжатие» сообщения?
4. Какие виды сжатия сообщений используются в технике связи?
5. Назовите основные методы сжатия без потерь информации.
6. Назовите основные методы сжатия с потерями информации.
7. Назовите три основных класса современных речевых кодеков.
8. На чем основывается принцип адаптивной дифференциальной импульсно-кодовой модуляции?
9. На чем основан принцип параметрического кодирования?
10. Поясните кадровую структуру цифровых вокодерных потоков.
11. Назовите основные стандарты компрессии цифрового видео и поясните в чем их различие.
12. Каким образом сокращается избыточность при передаче многоканальных цифровых телефонных потоков?
13. С какой целью применяется сжатие заголовков пакетов TCP/IP?

8 Особенности и перспектива развития сетей VSAT

8.1. Общие сведения о спутниковых сетях связи VSAT

В настоящее время большое развитие получили земные станции спутниковой связи типа VSAT (Very Small Aperture Terminal), которые устанавливаются непосредственно у пользователей и не требуют для обслуживания постоянного высококвалифицированного персонала. Эти станции применяются обычно в выделенных сетях, частных и деловых, для передачи данных и телефонии в режиме только на прием или на прием и передачу. Они имеют антенны диаметром 1,8...3,5 м, скорости передачи в цифровом виде до 2 Мбит/с, мощность передатчика в несколько ватт и работают чаще всего в диапазонах частот ФСС 6/4 и 14/12 ГГц.

В данное время в мире установлено более 900 тыс. терминальных станций VSAT, а темпы роста мирового рынка этого вида связи составляют в среднем около 15 % в год. Соответственно, ожидается, что количество VSAT терминалов в мире к 2015 г. достигнет 3 млн.

В России рынок VSAT пока далек от насыщения, однако эти системы связи востребованы, и в ближайшие годы его рост может составить сотни процентов в год.

8.1.1. Отличие VSAT-сетей от локальных или наземных региональных компьютерных сетей

Поскольку рассматриваемые сети включают в свой состав космический сегмент линии связи, они существенно отличаются от наземных региональных компьютерных сетей, хотя во многом их назначение аналогично.

В то же время VSAT-сети характеризуются особыми свойствами [24]:

- 1) большой задержкой времени распространения сигнала при передаче данных. Так эта задержка при односкачковом распространении сигнала в обратном канале (in route) от VSAT-станции на ретранс-

лятор и от ретранслятора к другой VSAT-станции составляет 330 мс. Только одно это обстоятельство нарушает работоспособность любой наземной системы управления сетью, а в зависимости от метода доступа к ресурсам ретранслятора указанная временная задержка может удвоиться или утроиться;

2) различными методами доступа к ресурсам ретранслятора;

3) асимметричным обменом данными, когда прямой канал (out route) от центральной станции к VSAT-станции использует совместно с большим числом других VSAT-станций этой сети широкую полосу частот. Обратный канал имеет меньшую полосу частот и совместно используется меньшим числом VSAT-станций;

4) недискретными отказами сети, когда сеть работает ненадежно. Сигналы в VSAT-сетях часто испытывают изменяющееся во времени ослабление в атмосфере, например при сильном дожде. Это приводит к понижению энергетических характеристик радиоканала, но не к полной потере связи, когда сеть продолжает функционировать с потерями до 70 % пакетов данных для пользователей;

5) пространственно-удаленным размещением VSAT-станций, поскольку часто они используются там, где локальная инфраструктура практически отсутствует. Это приводит к тому, что некоторые VSAT-станции получают электропитание от солнечных батарей. Удаленное размещение приводит к тому, что среднее время наработки на отказ (Mean Time Between Failure, MTBF) оборудования VSAT-станций должно быть достаточно большим и оно должно быть надежно защищено от внешних метеорологических воздействий, все устройства должны иметь дистанционное управление. Оборудование VSAT-станций должно быть устойчивым к отказам, в том числе к перебоям электропитания и преодолевать эти отказы автоматически. Механические устройства оборудования должны выполняться с высокой точностью, поскольку отклонение оси зеркала антенны на несколько десятых долей градуса от заданного направления может привести к снижению принимаемой мощности наполовину;

6) передачей сигналов управления сетью в том же радиоканале, в котором работает сеть. Почти всегда в VSAT-станциях не используются сигналы управления сетью с передачей по отдельному каналу (т. е. второе соединение для непрерывного контроля первого), которое может иметь собственные проблемы, например необходимость контроля обмена данными;

7) использованием специальных методов и сеансовым режимом работы сети. Большие временные задержки при использовании VSAT-технологии не позволяют использовать отдельные сеансовые протоко-

лы. Полезное использование полосы частот должно быть повышено до 90 % путем применения специальных методов, таких, как подавление сигналов подтверждения. Однако это может привести к проблемам в системах управления наземными сетями;

8) отсутствием стандартов, поскольку при использовании VSAT-технологии связи не существует промышленных стандартов и каждый провайдер имеет свои собственные протокол и оборудование. Это оборудование сложно интегрировать с оборудованием других производителей, в том числе с системами управления сетью.

Эти отличия VSAT-сетей от локальных или наземных региональных компьютерных сетей относятся только к сравнительно простым VSAT-сетям. На самом деле большая часть сетей являются гибридными, с широким набором технологий и протоколов, таких, как ATM, Frame Relay, ISDN, VPN и Ethernet, и с использованием стандартного сетевого оборудования (маршрутизаторов, коммутаторов, центральных станций, брандмауэров и серверов). Система управления такой гибридной сетью способна работать со всем этим оборудованием, включая специфические условия VSAT-сетей.

8.1.2. Типы сетей VSAT

По набору предоставляемых услуг все VSAT-сети условно разделяются на полнофункциональные с полным набором услуг, интерактивные, или сети обмена данными с многими услугами, и специализированные с несколькими отдельными услугами. Следует заметить, что полного набора услуг реально не предоставляет ни одна из сетей, так как набор таких услуг постоянно увеличивается.

Часто сети обмена данными называют интерактивными, и для этого имеются основания, поскольку реализуется взаимодействие пользователей. Считается, что полнофункциональные сети в отличие от специализированных сетей не ориентированы на предоставление только некоторых услуг, например услуг сельской телефонии, технологической связи и т. п. В соответствии с этим условным делением самыми распространенными VSAT-сетями являются интерактивные сети (примерно 86 % всех VSAT-сетей, 10 % сетей — полнофункциональные и 4 % — специализированные). Однако полнофункциональные сети часто противопоставляют интерактивным, что неверно, так как полнофункциональные сети априорно интерактивные.

С технической точки зрения в основу классификации VSAT-сетей целесообразно положить характер обмена данными: двухсторонний и односторонний (вещание), а также топологию сетей.

Спутниковые ретрансляторы VSAT-сетей обычно поддерживают одностороннюю передачу данных в виде вещания и приложения к нему в виде двухсторонней передачи данных (их часто называют интерактивными). Среди последних видов обмена выделяют интерактивные VSAT-сети с несимметричным обменом данными.

VSAT-сети с односторонней передачей данных не пользуются ширококвещательной спутниковой службой BSS.

Внедрение цифровых технологий предоставило провайдером и пользователям большую гибкость в работе. Так, станция управления в составе потока ширококвещания посылает и сигналы, кодированные специальным образом. Патентованное программное обеспечение, предоставляемое провайдерами для терминалов группы пользователей, обеспечивает доступ (за соответствующую плату) к этой части ширококвещательного обмена данными. Эта форма выбора каналов получила наименование узкоквещания (*narrowcasting*). В зоне обслуживания ширококвещания может находиться множество групп пользователей, получающих за дополнительную плату услуги узкоквещания.

Интерактивные VSAT-сети с несимметричным обменом данными (*Split-Two-Way* или *Split-IP*) используются при недоступности высококачественного обратного канала, такого, как в системах ширококвещательной спутниковой службы Ku-диапазона частот, организующего обмен данными в сети Интернет. Относительно высокая скорость передачи данных входящего потока не дополняется высокой скоростью передачи данных от VSAT-станции. Если прямой канал «борт — Земля» ширококвещательной спутниковой службы используется провайдером услуг Интернета только в качестве канала доставки данных до пользователя, то единственной возможностью организовать обратный канал для пользователя является телефонная сеть общего пользования. Следовательно, протокол сети Интернет разделяется на две части: между прямым спутниковым каналом «борт — Земля» и наземным телефонным каналом «Земля — борт». Преимущество такого подхода состоит в том, что VSAT-станция не используется в режиме передачи данных, что существенно снижает ее стоимость, упрощает ее функциональную структуру, исключает возможность создания помех другим радиосредствам. Недостаток VSAT-сетей с несимметричным обменом данными состоит в том, что обычно доступ в телефонную сеть общего пользования реализуется с помощью модема, скорость передачи которого не превышает 56 кбит/с.

В случае интерактивных VSAT-сетей обратный канал вводится в состав сети таким образом, чтобы он устанавливался через ретранслятор того же спутника, что и прямой канал. Объединенная

VSAT/WLL-сеть, рассмотренная выше, является интерактивной, позволяющей устанавливать двухсторонние соединения между центральной станцией (шлюзом) и любой VSAT-станцией. Следовательно, интерактивные VSAT-сети являются общим классом сетей этого типа, поэтому в дальнейшем будем рассматривать этот класс VSAT-сетей. подклассами которого являются VSAT-сети вещания с односторонней передачей данных и интерактивные VSAT-сети с несимметричным обменом данными.

8.2. Технологии, используемые в сетях VSAT для создания корпоративных сетей

Различные технологии построения сетей VSAT определяющие топологию, организацию множественного доступа, способ предоставления каналов, имеют свои особенности, влияющие на потребительские характеристики сетевого оборудования. Они определяют пропускную способность, задержки сигнала во времени, сложность технического обслуживания, стоимость проектирования. Эти особенности имеют также важное значение при принятии решений по развертыванию и внедрению спутниковых сетей связи [25].

Представляют интерес сетевые технологии SCPC (Single Channel Per Carrier) и MCPC (Multi Channel Per Carrier). Эти технологии активно применяются для построения небольших сетей с интенсивным трафиком. Каждая земная станция (ЗС), реализующая технологию SCPC или MCPC, имеет выделенный для нее постоянный сегмент емкости ретранслятора, через который поддерживается постоянное соединение. Достоинство данных технологий в том, что они гарантируют необходимую пропускную способность канала спутниковой связи, а недостаток — в отсутствии возможности динамического перераспределения ресурса ретранслятора между узлами связи, в том числе тогда, когда необходимо передавать трафик со скоростью большей, чем скорость передачи несущей станции сети. Каналы SCPC просты в реализации, однако эффективность использования дорогостоящего космического сегмента в корпоративной сети на их основе ниже, чем в любой другой системе спутниковой связи с многостанционным доступом к одному и тому же частотному ресурсу (TDM, TDMA, DAMA и др.).

Так, многостанционный доступ (Demand Assigned Multiple Access, DAMA) — способ предоставления ресурса спутникового ретранслятора по требованию, когда канал выделяется пользователю только на время проведения сеанса связи, что обеспечивает экономное использование ресурса спутниковой емкости. В некоторых реализациях

технологии DAMA предусмотрена возможность установления SCPC-соединений в зависимости от потребностей пользователей с разной пропускной способностью. Оборудование DAMA позволяет поддерживать полносвязную сетевую топологию.

TDM/TDMA (Time Division Multiplexing/Time Division Multiple Access) — комбинированная технология сетей с топологией типа «звезда». В сети с применением технологий TDM/TDMA центральная ЦЗС (ЦЗС) связывается со станциями пользователей с помощью одного или нескольких закрепленных каналов TDM с временным мультиплексированием. Передача информации в обратном направлении осуществляется по каналам TDMA с разделением по времени.

FTDMA (Frequency Time Division Multiple Access) — технология для сетей с разными топологиями (полносвязная — «каждый с каждым» или «звезда»), которая выбирается в зависимости от вида основного трафика (телефония или передача данных). В сети FTDMA ЦЗС организует связь для удаленных станций, предоставляя им свободные временные слоты, организованные на нескольких несущих полосах частот.

MF-TDMA (Multi Frequency-Time Division Multiple Access). Эта технология предоставляет множеству станций динамический доступ к общим частотным каналам с временным разделением. При этом может использоваться совокупность каналов с разной пропускной способностью, т. е. станция перестраивается не только по частоте, но и по скорости информационного потока. Технология MF-TDMA обладает двумя важными особенностями. Первая — это возможность динамического переназначения всего спутникового ресурса определенному соединению или даже направлению передачи трафика. Вторая — схожесть конфигураций и рабочих характеристик (диаметр антенны и мощность приемопередатчика) ЦЗС и периферийных терминалов. От терминалов ЦЗС отличается наличием системы управления сетью, осуществляющей мониторинг работы и имеющей средства изменения ее конфигурации. При необходимости эту систему можно развернуть на любом из терминалов. Таким образом, земной сегмент сети имеет высокую степень отказоустойчивости, однако ценой этому является более высокая стоимость оборудования терминалов.

Выбор той или иной технологии зависит от типа и назначения создаваемой корпоративной сети [26]. Поскольку все многообразие потенциальных приложений систем спутниковой связи довольно полно отражается в режимах работы их периферийных или абонентских терминалов, корпоративные сети целесообразно классифицировать по уровню средней рабочей нагрузки терминала, поддерживающего пе-

редачу данных, телефонию и другие приложения, например видеоконференцсвязь, в дневное время и в рабочие дни. При асимметричном трафике в расчет принимается только средняя скорость передачи данных по обратному каналу.

К основной категории относятся сети с низкой нагрузкой, в которых терминалу достаточно иметь пропускную способность не более 32 кбит/с, причем организовывать телефонную связь или не требуется, или же пользователям терминала необходима только одна телефонная линия. Основные функции таких сетей — сбор телеметрии, интернетизация школ, обеспечение работы сети банкоматов и др. Как правило, в таких сетях насчитывается от 50 до 10 тыс. терминалов, центральный узел сети в основном занимается обработкой информации, поступающей от терминалов. Для сетей с низкой нагрузкой типичными являются протоколы передачи данных X.25 и IP.

8.2.1. Топология сетей связи

Сети типа «звезда». Для организации сетей с топологией типа «звезда» и большим числом абонентских терминалов с низкой нагрузкой наиболее эффективными считаются технологии TDM/TDMA и FTDMA. В таких сетях все терминалы напрямую в один спутниковый скачок взаимодействуют только с ЦЗС (рис. 8.1).

Благодаря этому появляется возможность применять маломощные и недорогие терминалы, компенсируя их низкую энергетику установкой на ЦЗС антенны большого диаметров свыше 5 м и более мощного. Так, например, для работы с отечественным спутником «Экспресс-6А» в Ku-диапазоне можно использовать терминалы TDM/TDMA или FTDMA с антенной диаметром 1,8 м и приемопередатчиком мощностью всего 1 Вт, что позволяет существенно снизить стоимость реализации проектов с большим числом терминалов. Помимо повышенных энергетических характеристик, ЦЗС должна иметь и высокий уровень надежности, поскольку от технического состояния этой станции зависит функционирование всей сети. Все это с учетом наличия средств управления сетью обуславливает высокую стоимость ЦЗС. Широко распространенными в мире спутниковыми системами, на основе которых строятся сети VSAT, являются системы PES (Personal Earth Station) фирмы Hughes Network System (США) и Skystar Advantage компании Gilat (Израиль), реализующие технологии TDM/TDMA и FTDMA соответственно.

«Смешанная» топология. Для построения больших сетей с низкой нагрузкой, предназначенных для передачи данных и организации телефонной связи между периферийными терминалами, используются системы, сочетающие в себе технологии TDM/TDMA для

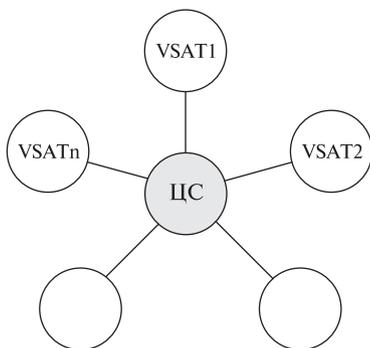


Рис. 8.1. Топология «звезда»

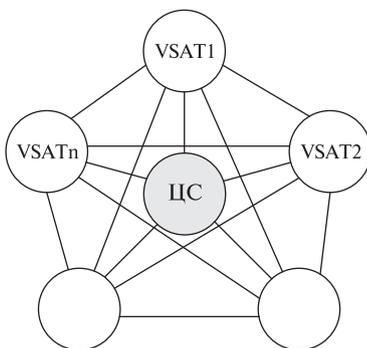


Рис. 8.2. Смешанная топология

передачи данных и DAMA для телефонии, или системы на базе технологии FTDMA, обеспечивающие связь типа «каждый с каждым» (рис. 8.2).

Терминалы таких систем связи стоят дороже, чем терминалы сетей с топологией типа «звезда», поскольку в них реализован дополнительный режим работы DAMA. К тому же для взаимодействия друг с другом они должны иметь более высокие энергетические характеристики. При использовании ретрансляторов Ку-диапазона российских спутников минимальный диаметр антенны для ЗС типа DAMA составляет 2,4 м. Системы HES (Hybrid Earth Station) фирмы Hughes Network System и Nextar AA/TDMA-BOD корпорации NEC поддерживают технологии TDM/TDMA и DAMA, а система FaraWay фирмы Gilat основана на технологии FTDMA.

Сети широкополосного доступа в Интернет. Отдельную группу образуют спутниковые сети связи для широкополосного доступа в Интернет. Как известно, они характеризуются значительной асимметрией трафика: объем информации, пересылаемой со всех абонентских терминалов на ЦЗС, в 3...10 раз меньше объема информации, передаваемой от самой ЦЗС к терминалу. В этих сетях для передачи высокоскоростного, до 40 Мбит/с, потока данных от ЦЗС к абонентским терминалам используется применяемая в цифровом телевидении технология DVB, а доступ терминалов к спутниковому сегменту для последующей передачи данных на ЦЗС осуществляется по технологии TDMA или FTDMA. В принципе технологии сетей широкополосного доступа в Интернет применимы и для дистанционного обучения или телемедицины, но только тогда, когда видеоизображение транслируется лишь в одном направлении — от ЦЗС, а связь в обратном направлении может быть ограничена передачей текстовых запросов или телефонными сообщениями.

Из-за быстрого роста потребности предприятий и индивидуальных пользователей в доступе к Интернету появились специальные системы, призванные решить эту задачу. К ним относятся следующие системы: DirecWay фирмы Hughes Network System и SkyBlaster компании Gilat (обе поддерживают технологию DVB), LinkWay.IP (реализуют технологию MF-TDMA) компании Comsat, вошедшей с недавних пор в состав фирмы ViaSat (США), а также целый ряд разработок отечественных операторов связи, например ЗАО «Московский Телепорт» или фирмы Web Media Services.

Сети со средней нагрузкой. Пользователями таких сетей обычно являются банки, производственные и торговые компании с разветвленной инфраструктурой филиалов и отделений, которым для передачи данных и организации нескольких телефонных каналов, а возможно, и видеоконференц-связи требуются ЗС с пропускной способностью 32...256 Кбит/с. Спутниковые сети с такой пропускной способностью применяются для организации дистанционного обучения и используются в телемедицине. В сетях, о которых идет речь, широко используются протоколы Frame Relay или IP, а их топология («звезда» или «иерархическая звезда» с числом станций от 10 до 100) зависит от структуры предприятий.

Сети с небольшим числом станций. Для реализации корпоративных и ведомственных сетей со средней нагрузкой и количеством удаленных терминалов до 15 часто применяют выделенные каналы SCPC и технологию MCPC. Эти сети могут иметь любую топологию, причем каждое направление связи на ЗС обеспечивается отдельным каналобразующим модулем.

На рынке представлены следующие системы связи с технологиями SCPC/MCPC: TRES фирмы Hughes Network System, SkyPerformer компании Clarent, а также станции спутниковой связи из отдельных модулей (антенна, приемопередатчик, спутниковый модем) отечественного и импортного производства.

Сети с большим числом станций. Для организации сетей со средней нагрузкой с числом пользовательских терминалов более 10 целесообразно использовать системы спутниковой связи на базе технологии MF-TDMA. Такая технология, построенная для полносвязной сети с большой пропускной способностью и неравномерным трафиком передачи информации, является оптимальной. По общей совокупной стоимости содержания такие сети могут успешно конкурировать с наземными связными инфраструктурами. Тенденция развития корпоративных сетей указывает на повышенный спрос на эти системы в ближайшие годы. Типичным образцом систем MF-TDMA можно назвать

SkyWAN фирмы ND SatCom (Германия) и LinkWay 2000 и ее модернизированный под VSAT-сети вариант LinkWay 2100 компании ViaSat.

Кроме спутниковых систем MF-TDMA, при большом числе терминалов и скорости передачи данных не выше 128 Кбит/с можно строить корпоративные сети на базе системы FaraWay компании Gilat или HES фирмы Hughes Network System. Эти системы обеспечивают полносвязную топологию сети и передачу данных в режиме DAMA с заданной скоростью передачи. Необходимость приобретения и установки дорогостоящей ЦЗС делает эти сети конкурентоспособными по сравнению с системами MF-TDMA только при большом числе абонентских терминалов.

Сети с высокой нагрузкой. Средняя рабочая скорость станции в сети с высокой нагрузкой составляет 256...2048 Кбит/с, а сами эти станции используются для передачи смешанного трафика (данные, Интернет, телефония, видеоконференцсвязь). Как правило, сети с высокой нагрузкой насчитывают небольшое число терминалов — от 5 до 25, между которыми организуется связь типа «каждый с каждым» с использованием технологии ATM или Frame Relay. Основные пользователи этого типа сетей — крупные общероссийские холдинги или телекоммуникационные компании, использующие спутниковые каналы для объединения крупных региональных офисов в единую сеть, а также для резервирования основной наземной сети.

При построении спутниковых сетей с высокой нагрузкой для технологии MF-TDMA практически нет альтернативы, поскольку организация многочисленных высокоскоростных каналов SCPC/МРСР экономически не эффективна. Сети такого типа можно реализовать на основе MF-TDMA-систем SkyWAN фирмы ND SatCom, LinkWay 2000 компании ViaSat и VSAT Plus II фирмы NSI. Может быть также использована особенность системы LinkWay 2000, поскольку имеется возможность ее работы не только с протоколами IP и Frame Relay, но и с протоколами ATM и SS7/ISDN. Общая пропускная способность корпоративной сети, построенной на базе такой системы велика, поскольку скорость передачи информации может достигать 32 Мбит/с.

8.2.2. Особенности организации ведомственной телефонной связи с помощью сетей VSAT

Прямой телефон. При помощи спутниковых систем связи типа VSAT может быть организована прямая телефонная связь с абонентами. Это решение отличается особенностью использования телефонных аппаратов без набора номера. При снятии трубки в удаленном населенном пункте, где расположен вызывающий терминал абонента,

по каналам спутниковой связи немедленно поступает вызов на телефонный аппарат вызываемого абонента. Такой вид связи может быть использован в системах диспетчерской связи, для оперативной связи медиков, пожарных, спасателей и там, где более сложная схема связи не нужна, например для связи с охранником на удаленном объекте.

Вынос абонентских линий офисной АТС в удаленные филиалы. Это техническое решение используется компаниями, которые имеют центральный офис с высокоскоростным выделенным каналом в крупном городе, для связи с удаленными филиалами или подразделениями, расположенными в местах, где нет другой связи. Через спутник по технологии IP создаются абонентские внутренние телефонные линии для корпоративной АТС. В результате телефоны в удаленных точках получают внутренние простые номера, например трехзначные. Все звонки осуществляются так же, как если бы эти телефоны физически находились в одном здании с центральным офисом. Сотрудники удаленных подразделений точно так же, как и сотрудники центрального офиса, могут воспользоваться выходом в городскую телефонную сеть набором дополнительного номера «9».

Такое решение особенно удобно тем, что для подключения удаленных подразделений не нужны дополнительные внешние телефонные линии. Таким образом компания может организовать для своих филиалов как внутреннюю, так и внешнюю телефонную связь без абонирования новых телефонных номеров.

Связь двух офисных АТС по IP. Это техническое решение используется для связи центрального офиса с относительно крупным филиалом, в котором недостаточно наличия одного-двух телефонов. Две таких офисных АТС можно соединить друг с другом по IP через два шлюза FXO и сеть IP. Сотрудник центрального офиса для связи с удаленным офисом набирает внутренний номер, например трехзначный номер шлюза. Шлюз «снимает трубку» и сотрудник слышит готовность для установления связи с дальней офисной АТС. После этого ему нужно набрать необходимый внутренний номер удаленного офиса, например двузначный, с тем, чтобы связаться с нужным сотрудником этого офиса. При желании он может набрать код выхода на внешнюю линию (обычно «9») и позвонить любому абоненту местной, например поселковой, АТС. Звонок из удаленного офиса в центральный происходит аналогичным способом.

Телефонная связь между двумя абонентскими станциями. Эту схему телефонной связи можно применить в том случае, когда как удаленный филиал, так и центральный офис не имеют высокоскоростного «наземного» подключения к Интернету, но имеют подключение

к спутниковому. «Двусторонний спутниковый Интернет» использует технологию, которая не позволяет напрямую связать через спутник две абонентские станции, однако связь возможна только через центральную станцию сети, «в два скачка». При такой связи имеет место довольно большая задержка сигнала во времени — от 500 миллисекунд до одной секунды, поэтому пользоваться телефонией с такими задержками очень неудобно. В подобных случаях можно использовать другие технологии, например TDMA или SCPC. Они обеспечивают прямую связь «в один скачок», но стоят существенно дороже.

Частная сеть IP-телефонии. Этот вид телефонии может быть использован для нескольких небольших подразделений при наличии Интернета для организации связи по принципу «любой с любым», когда голосовые шлюзы могут выполнять функции небольшой «виртуальной АТС». Так можно создать частную телефонную сеть с внутренней нумерацией собственных абонентов, где связь будет осуществляться так же, как если бы все телефоны были физически подключены к одной офисной АТС без выхода в город. Телефоны, подключенные к Интернету через спутниковый канал связи, могут осуществить аналогичную процедуру, разница будет только в различии времени задержки.

8.3. Мультисервисная DVB-RCS платформа для сетей VSAT

Компаниями MediaSputnik и EMS Satellite Networks разработана мультисервисная DVB-RCS платформа, которая обеспечивает высокоскоростной спутниковый доступ с приложениями реального времени (передача данных, голос, видео и т. д.), а также стандартные IP приложения (Интернет/Интранет, электронная почта, передачи файлов и т. д.). Топология такой сети на базе мультисервисной DVB-RCS платформы чаще всего строится по типу «звезда» и подразумевает наличие двух трактов передачи:

- прямой канал — спутниковый канал от Центральной земной станции (ЦЗС/HUB) до удаленных спутниковых интерактивных терминалов (СИТ/SIT);
- обратный канал — спутниковый канал от терминала до Центральной земной станции.

Стандарт DVB-RCS утвержден Европейским Институтом Стандартизации в области Связи (ETSI) в 2000 г. Он предлагает прямой канал, основанный на формате данных DVB/MPEG 2, и обратный канал на основе режима множественного доступа с разделением по времени (MF-TDMA). Широкополосная несущая DVB/MPEG-2 может

обеспечить скорость передачи в прямом канале до 110 Мбит/с, а режим MF-TDMA предусматривает скорость до 2...4 Мбит/с в обратном канале от каждого удаленного терминала [27].

Платформа DVB-RCS обеспечивает широкий спектр телекоммуникационных услуг, включая доступ к глобальной сети Интернет, построение географически распределенных LAN/WAN, передачу данных, организацию речевых каналов и видеоконференций по требованию. При этом спутниковые терминалы могут использоваться для различных уровней потребителей услуг: от крупных предприятий и провайдеров услуг до конечных пользователей. Прямой канал системы соответствует требованиям стандартов MPEG2 и ETSI/DVB, регламентирующих цифровое телевидение. Трафик прямого канала мультиплексируется на Центральной земной станции в общий широкополосный поток DVB/MPEG-2 и ретранслируется через спутник на сеть станций VSAT. Этот поток передается с модуляцией QPSK и кодированием Витерби/Рида–Соломона. Для корректного взаимодействия сети Интернет/Интранет с локальными сетями и передачи данных от станций пользователей до центральной станции используются широко известные сетевые стандарты и протоколы, в частности протоколы маршрутизации в среде Интернет (IP) и асинхронный режим передачи (ATM).

Данные о распределении спутникового ресурса, включая временные и частотные слоты, а также другие служебные сообщения также мультиплексируются в общий транспортный поток прямого канала.

По установленному стандарту алгоритму удаленные терминалы синхронизируются с прямым каналом, регистрируются на Центральной земной станции и для каждого терминала выделяется частотно-временной план в терминах MF-TDMA слотов. При этом удаленные терминалы используют разноплановую MF-TDMA схему доступа в спутниковую сеть. Так, например, режим MF-TDMA обеспечивает группам терминалов первичную связь с ЦЗС с использованием слотированных пакетов ALONA. Центральная же земная станция выделяет своим авторизированным и активным терминалам ряд пакетов, каждый из которых назначает частоту, полосу, время начала и длительностью временного слота.

Основанная на открытом стандарте ETSI EN 301 790 данная технология связи обеспечивает совместимость оборудования различных производителей в одной спутниковой сети.

Мультисервисная DVB-RCS платформа обеспечивает скорость передачи данных в одном прямом канале до 110 Мбит/с при использовании технологии DVB-S2 и скорость одного обратного канала до

4 Мбит/с с общим количеством до нескольких тысяч зарегистрированных в системе терминалов.

В стандарте DVB-RCS использование технологий DVB-S(S2) для прямого канала оправдывается прежде всего экономическими соображениями. Недорогие массовые DVB-S2 компоненты уже существуют и применяются, в то время как применение возможно более эффективных схем и фирменных стандартов потребуют повышенных расходов и большего времени на внедрение и развитие оборудования для центральных станций и терминалов.

Система DVB-RCS при использовании каскадного кодирования Рида-Соломона и Витерби обеспечивает более высокую эффективность полосы спутникового канала связи при заданном коэффициенте ошибок, а следовательно, увеличивает эффективность использования бортовой мощности. Используемые версии DVB-RCS системы еще более улучшают эти характеристики за счет применения турбокодирования, которое обеспечивают повышение энергетики более чем на 1 дБ в зависимости от длины пакета.

В DVB-RCS всегда можно выбрать тип пакетов трафика в обратном канале, поскольку IP пакеты могут передаваться как в ATM ячейках, так и в MPEG2 пакетах, несмотря на то что более короткие ATM пакеты в большинстве сервисов более выгодны с точки зрения пропускной способности и с точки зрения задержек.

В обратном канале DVB-RCS системы используется модуляция QPSK, которая признана в качестве оптимального компромисса между требуемой мощностью и эффективностью использования полосы для множественного доступа через спутниковые сети.

Мультисервисная платформа DVB-RCS поддерживает следующие сервисы и режимы доступа к данным.

Доступ в режиме Unicast (точка-точка). Система DVB-RCS через спутниковую сеть обеспечивает доступ в этом режиме для каждого абонентского терминала к ресурсам корпоративной мультисервисной сети или к сети Интернет. В обратном канале используется описанный в RFC-2684 метод LLC-SNAP инкапсуляции IP поверх AAL5/ATM.

Терминал VSAT может быть при этом непосредственно подключен к локальной компьютерной или телефонной сети, и всем станциям назначается статический IP-адрес.

Режим Multicast. Схема реализации режима Multicast разработана таким образом, чтобы не было необходимости передачи сигнализации IGMP, занимающей значительную часть пропускной способности сети. Данные при этом передаются с использованием основанного

на рекомендациях RFC 1112 (передача IP Multicast по PID таблице) соответствия между IP multicast адресами и MAC адресами multicast трафика. На стороне пользовательских станций параметры DVB и IP multicast терминалов настраиваются на соответствие IP multicast адресам, локальным PID фильтрам и фильтрам MAC адресов. Для приема multicast трафика на спутниковом терминале не требуется использование обратного канала.

Поддержка SLA. Система DVB-RCS может поддерживать процедуру управления соглашением об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA), представляющее собой контракт между клиентом и провайдером услуг, между внешней сетью, спутниковой сетью и локальными сетями. Функция управления SLA в прямом канале и обратном канале заложена в базовой конфигурации системы.

Поддержка VPN. VPN — виртуальные персональные сети — ориентированы на организацию связи с удаленными друг от друга подразделениями. Применение VPN сокращает эксплуатационные расходы, поскольку инфраструктура принадлежит сетевому оператору, распределяющему ресурсы физической сети между корпоративными VPN. По существу, технология VPN выполняет строгое разделение между различными сетями этого вида в целях обеспечения конфиденциальности и качества обслуживания.

Поддержка виртуальной ЛВС (VLAN) представляет собой логическую группу сегментов ЛВС, не зависящую от физического местоположения и организованную на основе общего набора критериев.

IP-телефония. Решение по IP-телефонии базируется на комбинации внешних VoIP шлюзов или Softswitch платформ со спутниковой сетью доступа DVB-RCS.

Поддержка топологии «вложенная звезда» (Multistar). Мультисервисная DVB-RCS платформа в топологии «вложенная звезда» состоит из главного шлюза и нескольких меньших ведомых шлюзов, расположенных в пределах зоны охвата главного шлюза. Каждый из ведомых шлюзов может автономно обслуживать свою подсеть терминалов.

Сеть на основе мультисервисной DVB-RCS платформы состоит из центральной наземной станции, множества удаленных пользовательских терминалов и спутника, обеспечивающего каналы связи в прямом и обратном направлении.

Центральная земная станция обеспечивает:

- передачу трафика прямого канала через ретранслятор на удаленные терминалы;

- прием от ретранслятора и маршрутизацию трафика обратного канала от удаленных терминалов;
- сетевую синхронизацию станций;
- распределение спутниковых ресурсов для спутниковых станций;
- подготовку и процедуру вещания данных и мультимедиа в различных режимах;
- аутентификацию абонентов и учет трафика;
- локальное или удаленное управление оборудованием ЦЗС и вспомогательным сетевым оборудованием.

Подсистема прямого канала предназначена для передачи данных через широкополосный спутниковый канал в направлении пользовательских терминалов VSAT. Данная технология основана на Европейском индустриальном стандарте ETSI EN 301 190, спецификации которого определяют механизмы инкапсуляции блоков IP данных в DVB поток и транспортировки частных данных в MPEG2 транспортном информационном потоке.

Мультиплексированный транспортный поток передается на DVB модулятор и после этого в радиочастотный тракт прямого канала, где осуществляется вставка PCR пакетов.

IP/DVB инкапсулятор/мультиплексор выполняет следующие основные функции:

- инкапсуляцию IP TCP, UDP, ICMP пакетов в транспортный поток MPEG2;
- мультиплексирование внешнего транспортного MPEG2 потока непосредственного вещания, трафика IP данных и информации сигнализации прямого канала в общий выходной транспортный поток со скоростью передачи данных до 110 Мбит/с;
- обеспечение прозрачной передачи сформированного транспортного потока для организации аудио-видеовещания в режиме DVB/MPEG2;
- назначение скорости передачи данных для каждого IP адреса приемника в диапазоне от 256 Кбит/с до 110 Мбит/с.

Модулятор DVB-S(S2) кодирует, модулирует и преобразовывает с повышением частоты транспортный MPEG поток прямого канала. Модулятор обеспечивает реализацию нескольких возможных скоростей упреждающего исправления ошибок (FEC), основанного на коде Рида-Соломона. Исходящий сигнал после этого модулируется с использованием фазовой QPSK или 8-PSK модуляции. Модулированный сигнал преобразуется в диапазон L (950...1450 МГц) и передается на радиочастотный тракт ЦЗС.

Сервер QoS является средством многоуровневого управления и контроля трафика, распознающим тип проходящего через сеть трафика. Этот сервер управляет трафиком на основе правил (или «политик»), которые устанавливаются в зависимости от специфических требований оператора.

Коммутатор DVB-ASI обеспечивает «горячее» переключение на резервный комплект подсистемы прямого канала по команде с сервера контроля или автономно.

Подсистема обратного канала принимает абонентский трафик и информацию сигнализации от пользовательских станций, а также готовит решения на запросы удаленного доступа (разрешение на вход в систему, распределение полосы и временных интервалов). Эта подсистема принимает, преобразовывает с понижением частоты, демодулирует и декодирует IP трафик абонента, инкапсулированный в ячейки ATM и передаваемый на MF-TDMA несущей со скоростью до 2 Мбит/с.

В обратном канале используется схема многостанционного доступа типа MF-TDMA (множественный доступ с частотно-временным разделением каналов). Существуют четыре типа радиочастотных пакетов обратного канала: трафик (TRF), захват синхронизации (ACQ), синхронизация (SYNC) и канал общей сигнализации (CSC). Пакеты трафика используются для передачи в обратном канале необходимых данных, в этом случае полезная нагрузка представляет собой 53-байтовые ячейки ATM.

Все типы пакетов передаются после защитного временного интервала, вводимого в целях снижения мощности передачи и компенсации ошибок синхронизации.

Эта схема является более эффективной по сравнению с традиционно используемыми для сетей VSAT, такими, как FDMA/TDMA или SCPC (single channel per carrier — один канал на несущую), где станции на время сеанса присваивается одна несущая. В системах FDMA/TDMA применяется процедура перераспределения информации в целях выравнивания пропускной способности среди ряда несущих. Планировщик составляет планы работы спутниковых станций в двумерном частотно-временном пространстве исходя из условия невозможности одновременного ведения передачи каждой станцией более чем на одной частоте. Пропускная способность сети используется при этом практически полностью, избегая появления фрагментации информации и неиспользуемых временных «дыр», что может происходить при работе схем SCPC и FDMA/TDMA.

Протокол планирования радиочастотного ресурса представляет собой один из вариантов коллективного доступа на основе комбинации свободного распределения ресурса и распределения ресурса по требованию. Протокол разработан для работы со всеми категориями запросов с целью обеспечения высокой пропускной способности. Особенностью данного протокола является отсутствие столкновений при доступе к каналу после первоначального входа при использовании протокола случайного доступа Slotted ALOHA.

Подсистема обратного канала также управляет станциями для балансировки нагрузки, компенсации затуханий в атмосфере, регулирования мощности передачи спутниковых станций. В соответствии со стандартом DVB-RCS используется схема управления мощностью передачи с замкнутым циклом, на основе измерения на ЦЗС отношения E_b/N_0 в обратном канале.

Подсистема обратного канала включает следующие основные модули:

- мультичастотный MF-TDMA демодулятор (Multi-Carrier Demodulator) с модулем преобразования частоты (MIF);
- трафик-процессор (Traffic Processor) с модулем вставки PCR;
- процессор сигнализации (Signaling Processor);
- процессор управления (OAM Processor).

Мультичастотный MF-TDMA демодулятор принимает пакетный трафик из радиочастотного тракта приемного канала земной станции и производит демодуляцию MF-TDMA пакетов. После демодуляции приемник отделяет АТМ ячейки от ячеек SAC и CSC пакетов трафика сигнализации. Демодулированные АТМ пакеты направляются трафик-процессору, а CSC пакеты передаются процессору сигнализации для обеспечения начальной инициализации станции при входе в сеть. Демодулятор также собирает статистику измерений параметров демодулированных пакетов и пересылает данную информацию процессору сигнализации для последующей обработки.

Трафик-процессор принимает упакованные в формат ячейки АТМ данные от демодулятора и направляет их в наземную сеть через коммутатор, а если в состав подсистемы обратного канала входит более одного демодулятора, то к граничному маршрутизатору. Трафик-процессором поддерживается операция вставки эталонов времени в транспортный поток прямого канала.

Процессор сигнализации имеет в своем составе контроллер терминалов (SIT Controller), планировщик (Scheduler) и контроллер сигнализации прямого канала (FSH).

Процессор управления в подсистеме обратного канала управляет процессором сигнализации каждого соответствующего демодулятора. Каждый процессор управления может управлять двумя процессорами сигнализации, каждый из которых приписывается к определенному банку демодуляторов.

Технические данные, приведенные ниже дают представление об основных параметрах типовой станции VSAT, использующей технологию DVB-RCS.

Диапазон частот, ГГц:

на прием Кu-диапазон	10,95...11,70; 11,70...12,75
С-диапазон	3,4...4,2
на передачу Кu-диапазон	14,0...14,5
С-диапазон	5,85...6,425

Поляризация

линейная горизонтальная/
линейная вертикальная

Сигнально-кодовая конструкция на приеме

DVB-S/S2, QPSK, 8-PSK

Сигнально-кодовая конструкция на передаче

DVB-RCS, QPSK

Диапазон быстрого переключения частоты на передаче

± 10 МГц от центральной частоты

Коэффициент сглаживания спектра на передаче ...

0,35

Метод доступа в обратном канале

MF TDMA

Информационная скорость, Кбит/с:

на передачу	64...8000
на прием	до 80000

Вид модуляции:

на передачу	QPSK
на прием	QPSK, 8-PSK (DVB-S2)

Коррекция ошибок. Тип и скорость кодирования:

на передачу	CC(1/2), TC (2/3, 4/5)
на прием	CC (1/2...7/8), RS

Поддерживаемые типы сервисов

на базе IP протоколов

Межсетевой протокол

IP v.4

Интерфейсы сопряжения терминала:

IP данные	100 Base-TX
вход промежуточной частоты (Rx)	«F» Female
выход промежуточной частоты (Tx)	«F» Female
интерфейс управления	Web

Характеристики антенно-фидерного устройства:

эффективная апертура антенны, м	1,2; 1,8; 2,4
кроссполяризационная развязка, дБ	>30
максимальная выходная мощность ВУС от внутреннего источника электропитания модема, Вт	4

Типичные значения EIRP/G/T:

2 Вт, 1,2 м	45,7 дБВт; 20,6 дБ/К
2 Вт, 1,8 м	49,2 дБВт; 24,4 дБ/К

Спутниковые интерактивные терминалы (СИТ) обеспечивают доступ в спутниковые сети с топологиями типа «звезда», «вложенная звезда» и «полносвязная» (опция).

Вопросы к главе 8

1. Что собой представляет земная станция спутниковой сети связи VSAT?
2. Какое основное оборудование содержит абонентский терминал сети VSAT?
3. Какие основные топологии используются при организации спутниковой сети связи VSAT?
4. Как конструктивно отличаются земные станции в зависимости от вариантов топологии?
5. На какие классы делятся земные станции VSAT по пропускной способности?
6. На основе каких наиболее распространенных спутниковых систем строятся сети VSAT?
7. Какие известные мировые фирмы и компании поставляют оборудование для сетей VSAT?
8. Какие основные технологии многостанционного доступа реализованы в оборудовании этих разработчиков?
9. Какие виды ведомственной телефонной связи могут быть организованы с помощью сетей VSAT?
10. Назовите основные особенности мультисервисной DVB-RCS платформы для спутниковых сетей связи VSAT.

9 Особенности мобильных спутниковых систем

Мобильные спутниковые системы (МСС), часть которых из-за компактности терминалов называют системами персональной спутниковой связи (СПСС либо ПСС), играют значительную роль в развитии телекоммуникаций. Увеличению доходов от услуг спутниковой связи способствовали ряд причин:

- новые маркетинговые схемы, ориентированные на корпоративного клиента, заключение новых и продление существующих контрактов с вооруженными силами и другими государственными заказчиками;
- расширение коммерческих программно-аппаратных решений, основанных на интерактивном слежении за объектами и отображении их на карте, представление в удобной форме статистических данных по показаниям различных датчиков (температура, давление, уровень топлива, скорость, датчики дверей, кнопка SOS и т. д.);
- катаклизмы на Земле в последние годы (ураганы, цунами и др.).

Различные системы персональной спутниковой связи обладают своими особенностями, обусловленными, главным образом, характеристиками их орбитальных группировок, но их пользовательские характеристики и предоставляемые услуги имеют много общего (как между собой, так и с наземными сотовыми системами) [29].

9.1. СПСС Inmarsat

На сегодняшний день наиболее широкое практическое применение имеет МСС Inmarsat. Inmarsat — первая глобальная спутниковая система подвижной связи, которая была введена в эксплуатацию в 1982 г. МСС Inmarsat использует геостационарные спутник-ретрансляторы, обслуживающие все океанские регионы. Для связи с мобильными объектами используется L-диапазон (1,5/1,6 ГГц). Передача сигналов производится через наземные (береговые) станции в С-диапазоне (4/6 ГГц) (рис. 9.1). Каналы в системе предоставляются по требованию.

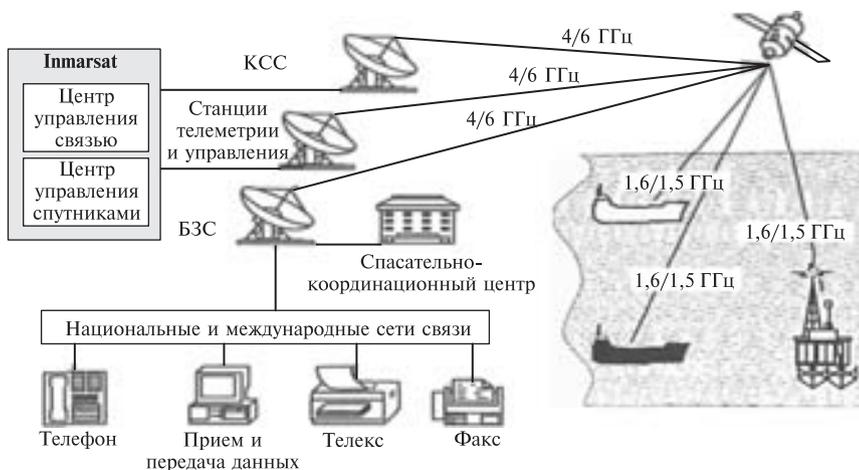


Рис. 9.1. Организация связи в ССС Inmarsat

Многие годы в системе использовались глобальные и достаточно широкие региональные лучи.

На рынке этой МСС предлагается свыше 30 типов абонентских терминалов как переносимых, так и подвижных для морского, сухопутного и воздушного использования, обеспечивающих передачу речи, коротких сообщений, факса и передачу данных [30].

Различные режимы организации связи, параметры сигналов для различных типов терминалов описываются следующими стандартами Inmarsat.

Стандарт А. Обеспечивал передачу речевого сигнала с использованием аналоговой частотной модуляции, требовал применения антенн большого диаметра и в настоящее время не используется.

Стандарт В. Обеспечивает передачу речи в цифровом виде и передачу данных со скоростями 0,3...9,6 кбит/с. Сигналы факсимильного оборудования передаются в демодулированном виде. Речь кодируется вокодером 16 кбит/с. Модуляция сигнала OQPSK. Применяется сверточный код $R = 3/4$ при передаче речи и $R = 1/2$ при передаче данных.

Стандарт С. Передача данные с низкой скоростью (до 1200 бит/с). Стандарт не предназначен для передачи речевых сообщений. Терминал размером с автомагнитоу. Обтекатель антенны по форме и размерам похож на мигалку на крыше автомобиля. Применяется модуляция ФМ-2, сверточное кодирование, скремблирование, перемежение.

Стандарт D. Спутниковый пейджер.

Стандарт Е. Спасательный аварийный буй, передающий сигнал бедствия.

Стандарт М. Является усовершенствованным (в смысле мобильности) стандарта В. Модуляция OQPSK скорость на демодуляторе 8 кбит/с. Речь кодируется вокодером IMBE 6,4 кбит/с. В режиме передачи данных передаются со скоростью 4800 бит/с. Применяется сверточное кодирование и аддитивный скремблер.

Стандарт мини-М. Усовершенствованный стандарт М. Терминал размером с ноутбук. Модуляция офсетная 5,6 кбит/с. Вокодер AMBE 4,8 кбит/с. Передача данных со скоростью 2400 бит/с.

Стандарт М4. Терминал М4 это фактически терминал «Мини М», у которого есть режим передачи цифровой потока со скоростью 64 кбит/с. При этом применяется модуляция КАМ-16 с символьной скоростью 33600 бод. Применяется турбокодирование.

Стандарт Аэро. Похож на стандарт В и на стандарт М, но с несколько отличными параметрами сигналов.

Запуск ИСЗ серии Inmarsat-4 позволил поддерживать функционирование широкополосной глобальной сети (Broadband Global Area Network, BGAN).

Зона обслуживания каждого ИСЗ Inmarsat-4 (рис. 9.2 и 9.3) формируется глобальным лучом (С-диапазон), 19 широкими лучами (L-диапазон) и 200 узкими лучами (L-диапазон). 19 широкополосных лучей обеспечивают рабочую зону всей видимой спутником поверхности для действующих услуг в системе Inmarsat. Эти направленные лучи имеют более совершенные рабочие характеристики, чем используемые на действующих в настоящее время спутниках Inmarsat-3. Они позволят обеспечить более высокие скорости передачи данных, предусмотренные для прогрессивных вариантов действующего набора терминалов пользователя.

Приблизительно 200 узконаправленных лучей покрывают значительную площадь континентального массива в пределах обзора со спутника. Эти узконаправленные лучи позволяют мобильным станциям получить доступ к новым службам мультимедиа в сети BGAN на скоростях передачи данных пользователя до 432 кбит/с.

9.2. СПСС Thuraya

Система персональной спутниковой связи Thuraya позволяет устанавливать телефонную связь через спутник связи на геостационарной орбите с помощью портативного терминала размером с трубку сотового телефона. Система обеспечивает высокий уровень усиления сигнала на трассе от спутника до терминала и сверхвысокую

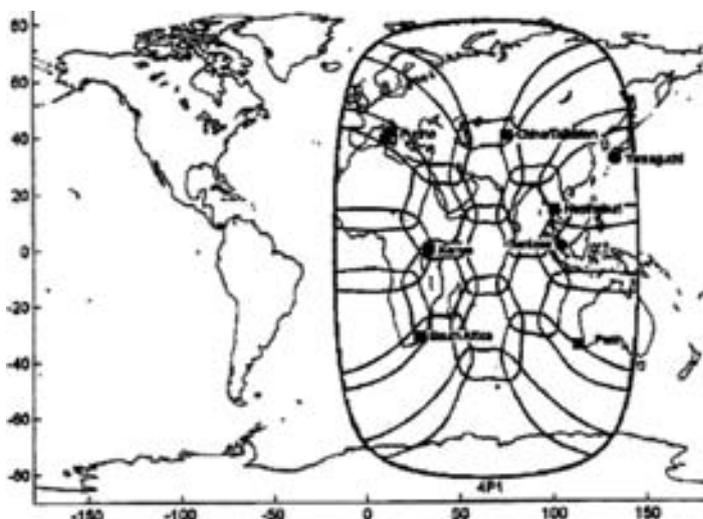


Рис. 9.2. Широкие лучи спутника Inmarsat-4

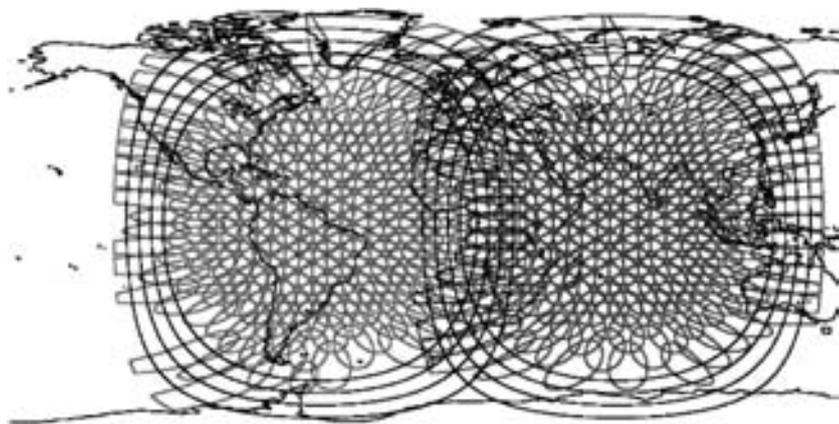


Рис. 9.3. Зоны освещенности спутников Inmarsat-4 для стандарта BGAN в Атлантическом и Индийском регионах

чувствительность приемника космического аппарата. Диаметр бортовой антенны, установленной на спутнике Thiruga-1, составляет 16 м (рис. 9.4), а необходимое электропитание спутник получает от двух 30-метровых солнечных батарей. Их мощности хватает и на поддержание деятельности всех бортовых устройств, включая суперпроцессор IBM. По своей производительности этот процессор эквивалентен трем тысячам одновременно работающих процессоров типа «Пентиум-3». Он обеспечивает работу бортового контроллера и коммутатора

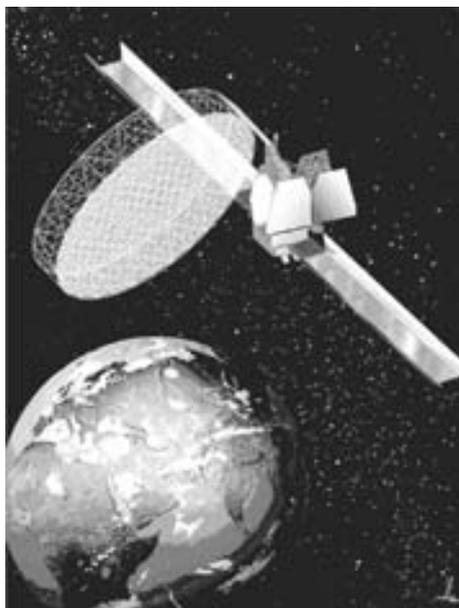


Рис. 9.4. Внешний вид ИСЗ связи Thuraya

и способен осуществлять одновременно до 12–14 тысяч соединений. Это значительно сокращает время задержек при телефонных разговорах, поскольку сигнал распространяется напрямую между спутником и наземными терминалами. Благодаря широкой зоне покрытия обслуживаемой территории со спутника (рис. 9.5) стало возможным использование лишь одного крупного земного шлюза при звонке на местные телефоны. Срок службы геостационарного спутника Thuraya-1 достигает 12...15 лет, и это более чем в два раза выше, чем у низкоорбитальных аппаратов Iridium.

Клиенты системы связи Thuraya имеют выход в сеть GSM, поскольку их абонентские трубки поддерживают GSM-стандарт. Оставаясь абонентом в сети GSM, можно вне зоны покрытия ее оператора переходить на роуминг сети Thuraya, и там, где сотовая связь отсутствует, GSM-номер остается доступным для всех звонков. Одним из существенных недостатков персональной спутниковой связи является невозможность телефонной связи из помещения. Это компенсируется специальной системой, подающей абоненту сигнал о том, что до Вас попытаются дозвониться. Телефон этой системы связи снабжен системой GPS для определения глобального местоположения пользователя с погрешностью до 100 метров в любой точке полушария.



Рис. 9.5. Зона покрытия ИСЗ связи Thuraya

Компанией Hughes для системы Thuraya разработана уникальная антенная система, обеспечивающая формирование 250–300 «узких» лучей. Эта возможность реализована за счет использования на борту цифровой диаграммообразующей схемы, позволяющей изменять конфигурацию лучей в зоне покрытия или создавать новые лучи. С помощью такой схемы обеспечивается гибкое перераспределение мощности между разными лучами с возможностью сосредоточения до 20 % общей излучаемой мощности в одном луче. Высокая спектральная эффективность системы достигается за счет 30-кратного повторного использования рабочих частот.

Вортовой ретранслятор Thuraya может организовать прямую связь между мобильными абонентами в разных лучах. Это позволяет избежать «двойных скачков», возникающих в случае сброса группового потока сначала вниз, затем коммутации на земных станциях сопряжения и возвращения обратно на борт КА. Что касается организации связи мобильных абонентов с абонентами сетей общего пользования, то она осуществляется в режиме bent-pipe, когда вся обработка информации осуществляется на Земле.

Высокая энергетическая эффективность ретранслятора Thuraya с энергетическими запасами в абонентской линии 10 дБ достигается не только за счет использования узких лучей, но высокой эффективностью системы электропитания солнечными батареями мощностью

13 кВт. Новые технологии многолучевых антенн и высокий уровень интеграции с наземными мобильными сетями делает такие системы весьма перспективными и востребованными на рынке персональной спутниковой связи.

9.3. СПСС Iridium



Рис. 9.6. Орбиты спутников Iridium

Первое место по зоне покрытия занимает Iridium (рис. 9.6), эта МСС обеспечивает 100%-е покрытие земного шара. Орбиты 77 низкоорбитальных спутников полярные. Особенностью системы является применение межспутниковой связи в диапазоне 23 ГГц для организации глобального охвата. При такой организации связи выход на наземные сети осуществляется с помощью немногочисленных станций сопряжения, с которыми пролетающие над ними спутники обмениваются суммарной глобальной

информацией в диапазоне 19/29 ГГц. Связь спутников с мобильными терминалами в L-диапазоне осуществляется в режиме FDMA/TDMA, сходном с применяющимся в сотовых сетях GSM. На одной частоте передается поток TDMA для 8 терминалов. Модуляция ФМ-4, применяется сверточный код ($r = 3/4$, $k = 7$). Вокодер VSELP-2,4 кбит/с.

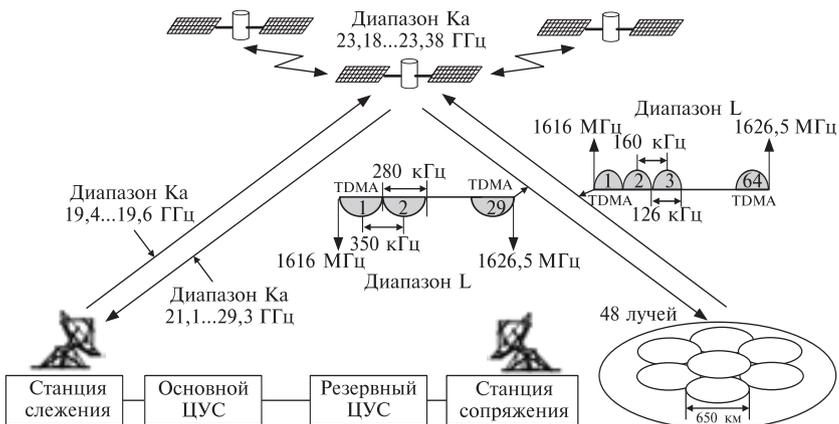


Рис. 9.7. Организация радиолиний в ССС Iridium

9.4. СПСС GlobalStar

Второе место по зоне покрытия занимает GlobalStar. Орбиты 48 низкоорбитальных спутников не охватывают полярные области, и связь на широтах выше 70° не обеспечивается (рис. 9.8) [31].

Прямая эстафетная межспутниковая связь не предусмотрена. Глобальность охвата территорий обеспечивается связью через наземные станции сопряжения (рис. 9.9).

Проект GlobalStar отличается применением системы множественного доступа с кодовым разделением (CDMA), фактически идентичной широко применяющейся сотовой наземной системе CDMA. Система с кодовым разделением особенно эффективно обеспечивает непрерывность связи при переходе абонента из зоны действия одного луча

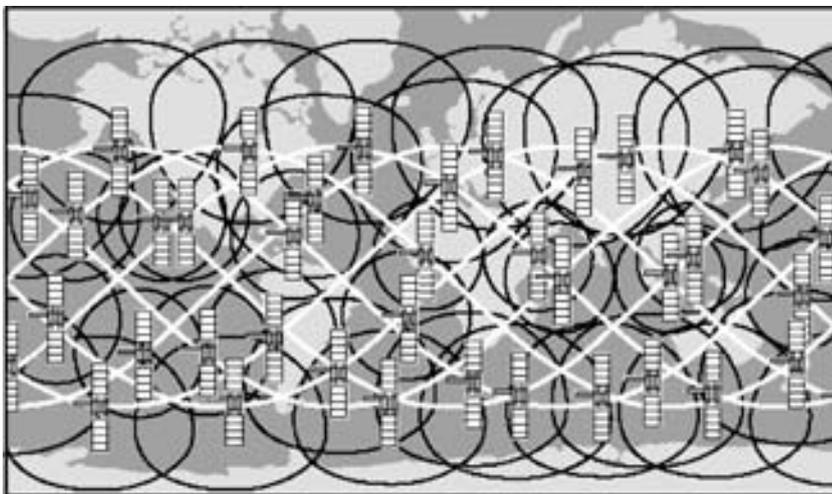


Рис. 9.8. Группировка спутников GlobalStar

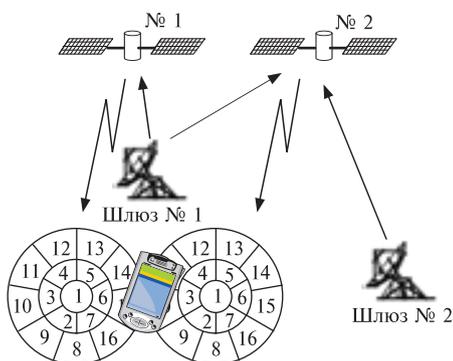


Рис. 9.9. Пути прохождения сигналов в ССС GlobalStar

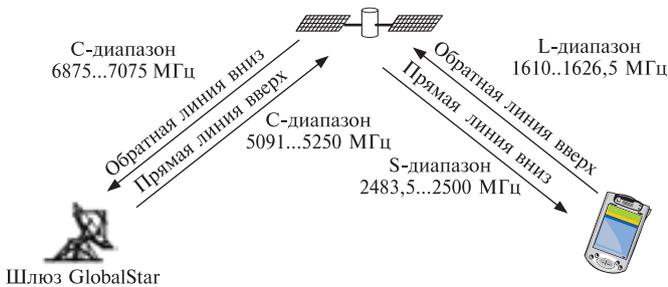


Рис. 9.10. Диапазоны частот GlobalStar

в зону действия другого луча одного и того же спутника и из зоны видимости одного спутника в зону видимости другого.

Также CDMA позволяет устранить эффект затемнения приемной антенны пользовательского терминала складками рельефа местности за счет когерентного сложения сигналов нескольких спутников, а также сигналов, отраженных от различных препятствий на земной поверхности. Нетрадиционно в системе GlobalStar использование диапазонов частот для связи с мобильным терминалом: на линии вверх применяются частоты 1610...1626,5 МГц (L-диапазон), на линии вниз — 2483,5...2500 МГц (S-диапазон) (рис. 9.10).

На прямой пользовательской стороне (от спутника к пользователю) и на обратной пользовательской стороне (от пользователя к спутнику) используются разные совокупности пространственно-разделенных лучей. На рис. 9.11 показан частотно-пространственный план на направлении терминал–спутник. В данном направлении в L-диапазоне 1610...1626,5 МГц используются 16 пространственно-разнесенных лучей с полосой 16,5 МГц. В каждом луче может быть до 13 спектральных полос систем с кодовым разделением с полосой 1,23 МГц. Каждый из этих спектров образуется при работе на единой несущей частоте с применением модуляции ФМ-4 одновременно 128 терминалов в режиме кодового разделения.

Переносимые терминалы этой системы могут передавать данные на скорости 256 кбит/с, основное назначение — предоставление услуг телефонной связи. Как правило, терминалы выполняются многосистемными и могут работать в наземных сотовых сетях.

9.5. Узкополосные системы мобильной спутниковой связи

Узкополосные системы мобильной спутниковой связи (системы little LEO) предоставляют услуги передачи данных, такие, как элек-

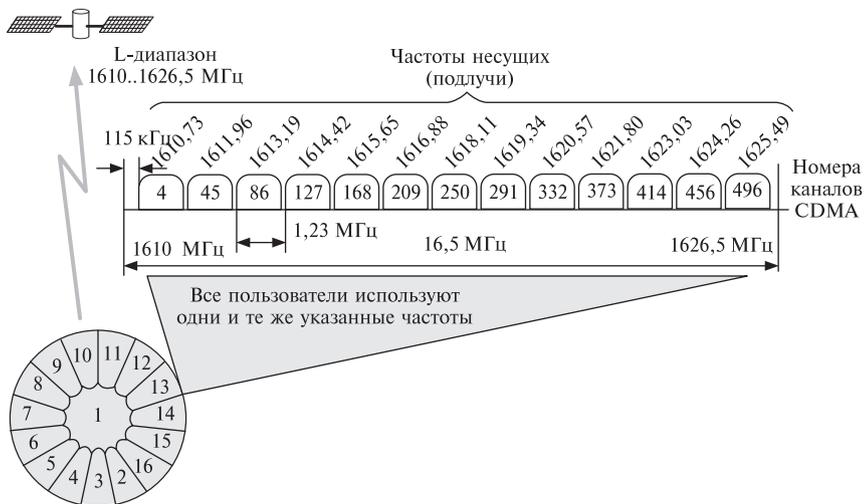


Рис. 9.11. Пространственно-частотный план обратной пользовательской линии GlobalStar

тронная почта, двусторонний пейджинг, услуги дистанционного контроля. Основные особенности данных систем — относительно низкая скорость передачи информации и возможность работы вне реального масштаба времени в режиме почтового ящика. Среди большого числа подобных систем следует выделить систему Orbcomm как первую и развивающуюся систему с постоянно расширяющейся географией рынка услуг. Пропускная способность системы рассчитана на подключение более 100 млн абонентов. Система Orbcomm предоставляет услуги узкополосной передачи данных, такие, как электронная почта, двусторонний пейджинг, услуги дистанционного контроля.

Следует выделить отечественную систему «Гонец», которая предназначена для передачи информации по принципу «электронная почта». Зона обслуживания системы 0...90° с.ш. и ю.ш. Космический сегмент состоит из 48 КА, расположенных на околокруговых полярных орбитах высотой 500 км с наклоном 820 (6 плоскостей по 8 КА в каждой плоскости). «Гонец» использует в направлении «Земля – КА» полосы частот 312...315 и 259...265 МГц, в направлении «КА – Земля» — 387...390 и 259...265 МГц. Бортовая антенная система имеет коэффициент усиления от 0 до 3 дБ. Мощность бортового передатчика 5...40 Вт. Скорость передачи информации с абонентских станций 2,4...9,6 и 4,8...64 кбит/с. Каждый ИСЗ имеет 12 каналов приема со скоростью 9,6 кбит/с и 2 канала передачи со скоростью 64 кбит/с. Пропускная способность одного ИСЗ не менее 400 Мбит/сутки. В сис-

теме используется многостанционный доступ с частотным и временным разделением каналов (МДЧР/МДВР). Земной сегмент состоит из четырех типов терминалов пользователей (АТС, АТОМ, АТ-А, АТ-П), региональных станций, семь из которых располагаются на территории России, двух центральных станций автоматизированной системы управления КА и связи в Москве и Красноярске.

9.6. Региональные системы мобильной спутниковой связи

В мире функционируют несколько региональных систем МСС. В Северной Америке это Mobile Satellite Ventures (MVS), использующая два спутника MSAT. В 2000 г. начала работать система Asia Cellular Satellite (Индонезия) со спутником Garuda, предоставляющая услуги МСС в Азиатском регионе. В том же году два спутника N-Star начали обслуживать абонентов морской МСС в 200-мильной прибрежной зоне Японии. В Австралии действует аналогичная система морской МСС Optus.

Большинство действующих региональных МСС используют геостационарные спутники связи и технологии, аналогичные Thuraya.

9.7. Перспективы развития мобильной спутниковой связи

Международный союз электросвязи определяет перспективы развития МСС как спутникового сегмента систем подвижной службы третьего поколения ИМТ-2000. Спутниковый сегмент будет обеспечивать покрытие тех зон обслуживания, где развитие наземной сети экономически неэффективно, в частности в удаленных и сельских районах. Общий подход основан на создании так называемой дополнительной наземной составляющей (Ancillary Terrestrial component, АТС). Его главная особенность состоит в том, что абонентские устройства в зоне действия базовых станций работают с наземной сетью, а при выходе из нее переключаются на работу со спутником, используя одну и ту же полосу частот. При этом системы МСС также сохраняют возможность независимого функционирования и предоставления требуемых услуг независимо от АТС. Они должны работать с абонентским оборудованием любого типа, в частности с трубкой, переносимым устройством, перевозимым устройством на борту судна, автомобиля и т. д.

Также предполагается, что спутниковый компонент ИМТ-2000 будет использоваться для соединения базовых станций и их подключения к сети общего пользования.

Перспективным направлением развития МСС является их использование не для передачи речи или широкополосного доступа в Интернет, а для предоставления различных вещательных услуг ИМТ-2000. В этом случае будут создаваться наложенные сети для наземных сетей подвижной связи, которые могут быть эффективны как с точки зрения экономики, так и использования спектра, предоставлять услуги по топологии «точка-много точек». Это может быть вещание звуковых и телевизионных программ и циркулярное распространение данных различного типа для всех или определенных категорий абонентов.

Требования к бортовым ретрансляционным комплексам перспективных СПСС включают решение следующих задач:

- разработка высокопроизводительных бортовых комплексов, позволяющих перейти от сегодняшних скоростей порядка 2 Гбит/с к скорости передачи данных на уровне 4...16 Гбит/с;
- внедрение и широкое применение усовершенствованных антенных систем, способных генерировать десятки или даже сотни лучей;
- интенсивное использование бортовых цифровых компонент и систем передачи информации;
- создание систем с высоким уровнем перестраиваемости, обеспечивающих гибкое управление радиоресурсами (мощностью сигналов, каналов передачи и т. п.);
- использование в спутниковых системах низкоорбитальных и среднеорбитальных ретрансляторов, хотя для отдельных применений спутники ГСО остаются эффективной альтернативой;
- интеграция с наземными телекоммуникационными сетями и применение стандартов наземных сетей связи во всех случаях, где против этого нет существенных возражений.

В перспективных системах СПСС должны использоваться:

- дешевые терминалы на базе СВИС и развитых DSP с малым энергопотреблением;
- мультирежимные терминалы для использования как для спутниковой, так и наземной связи;
- программируемые радиоподсистемы для мобильных терминалов;
- технологии новых частотных полос (Ka, V);
- эффективные методов модуляции и кодирования;
- совместимость всех протоколов и интерфейсов на 2-м уровне и выше (кроме физического уровня, где параметры радиосигнала должны оставаться специфичными для спутниковой системы);
- стандартные транспортные протоколы для пакетной передачи данных (IP и ATM).

Кроме требований к ретрансляторам и терминалам, в перспективных СПСС все более важное значение приобретают требования межсетевого взаимодействия. Глобальные ССС особенно критичны к реализации этих требований и должны обеспечивать взаимодействие с другими телекоммуникационными системами на уровне всех наиболее распространенных и общепризнанных протоколов: SDH, ATM, TCP/IP, GSM/MAP, UMTS, IMT-2000. Необходимо отметить, что тенденция интеграции сетевых технологий в стандарте спутниковых и наземных сегментов становится все более важной при развитии ССС. При этом наземные протоколы и стандарты будут играть все более определяющую роль в развитии широкополосных спутниковых технологий и мультимедийных услуг.

Отметим следующие важные для перспективных ССС технологические области:

- антенны с большой апертурой;
- управляемые антенны;
- высокомоощные платформы КА;
- бортовые коммутаторы и узлы связи;
- оптические технологии связи;
- аппаратура передачи в диапазоне 30-120 ГГц;
- малогабаритные бортовые оптические терминалы для межспутниковых линий связи в геостационарных системах.

Вопросы к главе 9

1. Какие спутниковые системы связи называются мобильными?
2. Назовите основные характеристики спутниковой передвижной (мобильной) системы связи Inmarsat.
3. Назовите технические возможности терминалов основных стандартов СПСС Inmarsat.
4. Каковы основные технические возможности СПСС Thraya?
5. Назовите основные технические возможности СПСС Iridium.
6. Каковы основные параметры СПСС GlobalStar?
7. Назовите основные региональные мобильные спутниковые системы связи и их особенности.
8. В каком направлении происходит развитие мобильных спутниковых систем связи?

10 Технологии формирования цифровых потоков

10.1. Плезioxронная цифровая иерархия

В настоящее время для организации наземных первичных транспортных сетей многоканальной цифровой телефонии и передачи данных используются цифровые потоки так называемой плезioxронной цифровой иерархии (PDH). Цифровые потоки, построенные по стандартам первого уровня иерархии PDH, являются самыми распространенными потоками, передаваемыми с помощью спутниковых модемов.

Иерархия PDH — это технология, основанная на мультиплексировании с временным разделением каналов и ИКМ. Она стала интенсивно развиваться в связи с переходом от аналоговых к цифровым методам передачи речевых сигналов.

Существует несколько видов реализаций ИКМ систем, признаваемых в качестве стандартных:

- T1 (AT&T, США, 1962), позднее названная Bell D1, — 24-канальная система с выходным потоком T1 1544 Кбит/с;
- D2 (Bell, США) — 24-канальная система, описана в ITU-T;
- U.K. (Великобритания) — 24-канальная система с выходным потоком 1536 Кбит/с;
- СЕРТ (Европа) — 30-канальная система с выходным потоком E1 2048 Кбит/с, описанная в рекомендации ITU-T.

При использовании цифровых методов мультиплексор (типа $n : 1$) формирует из n входных цифровых последовательностей одну выходную последовательность, состоящую из повторяющихся групп по n одноименных блоков, сформированных за «тайм-слот». Теоретически такой мультиплексор должен обеспечить скорость передачи данных порядка nv где v — предполагаемая одинаковой для всех каналов скорость передачи данных одного входного канала.

Из сигналов отдельных каналов ИКМ на скорости 64 кбит/с можно с помощью мультиплексора типа $n : 1$ сформировать общий поток со скоростью $64n$ кбит/с. Если считать этот мультиплексор первым в общей схеме покаскадного соединения нескольких мультиплексоров

второго, третьего и т.д. уровней типа $m : 1, l : 1, k : 1$, то можно сформировать различные иерархические наборы цифровых скоростей передачи, или цифровые иерархии. Эта иерархия позволяет довести процесс мультиплексирования, или уплотнения каналов до необходимого уровня, дающего требуемое число каналов DSO на выходе выбором различных коэффициентов кратности n, m, l, k .

Три такие иерархии были разработаны в начале 80-х годов прошлого века. В первой из иерархий, принятой в США и Канаде, в качестве скорости сигнала первичного цифрового канала ПЦК (DS1) выбрана скорость 1544 кбит/с (фактически $n = 24$, т.е. двадцать четыре цифровых телефонных канала по 64 кбит/с, а для передачи данных — 24 информационных канала по 64 кбит/с).

Во второй, принятой в Японии, использовалась та же скорость для DS1.

В третьей, принятой в Европе и Южной Америке, в качестве первичной была выбрана скорость 2048 кбит/с (формально $n = 32$, фактически $n = 30$, т.е. в качестве информационных используется тридцать телефонных или информационных каналов 64 кбит/с плюс два канала сигнализации и управления по 64 кбит/с).

Первая иерархия, со скоростью 1544 кбит/с, дает последовательность вида: DS1 – DS2 – DS3 – DS4, или последовательность 1544 – 6312 – 44736 – 274176 кбит/с (часто используется ряд приближенных величин 1,5 – 6 – 45 – 274 Мбит/с). Это с учетом скорости DS0 соответствует ряду коэффициентов мультиплексирования $n = 24, m = 4, l = 7, k = 6$. Указанная иерархия позволяет передавать соответственно 24, 96, 672 и 4032 каналов DS0.

Здесь и далее DS0 – DS4 мы будем называть цифровыми каналами 0-го, 1-го, 2-го, 3-го и 4-го уровней иерархии соответственно. В терминологии связи это *основной* цифровой канал (ОЦК), *первичный* цифровой канал (ПЦК), *вторичный* цифровой канал (ВЦК), *третичный* цифровой канал (ТЦК) и *четвертичный* цифровой канал (ЧЦК) соответственно.

Вторая иерархия, порожденная скоростью 1544 кбит/с, давала последовательность DS1 – DS2 – DSJ3 – DSJ4, или последовательность 1544 – 6312 – 32064 – 97728 кбит/с (ряд приближенных величин составляет 1,5 – 6 – 32 – 98 Мбит/с), что с учетом скорости DS0 соответствует ряду коэффициентов мультиплексирования $n = 24, m = 4, l = 5, k = 3$. Указанная иерархия позволяет передавать соответственно 24, 96, 480 и 1440 каналов DSO.

Здесь DSJ3 и DSJ4 называются цифровыми каналами 3-го и 4-го уровней японской PDH-иерархии.

Таблица 10.1

Уровень цифровой иерархии	Скорости передачи, соответствующие различным схемам цифровой иерархии, кбит/с		
	АС, 1544	ЯС, 1544	ЕС, 2048
0	64	64	64
1	1544	1544	2048
2	6312	6312	8448
3	44736	32064	34368
4	–	97728	139264

Третья иерархия, порожденная скоростью 2048 кбит/с, дает последовательность потоков E1 – E2 – E3 – E4 – E5, или последовательность скоростей 2048 – 8448 – 34368 – 139264 – 564992 кбит/с (ряд приближенных величин составляет 2 – 8 – 34 – 140 – 565 Мбит/с), что соответствует ряду коэффициентов $n = 30$ (32), $m = 4$, $l = 4$, $k = 4$, $i = 4$ (коэффициент мультиплексирования в этой иерархии выбран постоянным и кратным 2). Эта иерархия позволяет передавать соответственно 30, 120, 480, 1920 и 7680 каналов DS0, что отражается и в названии ИКМ систем: ИКМ-30, ИКМ-120, ИКМ-480 и т. д.

Основные характеристики этих иерархий, известных под общим названием *плеззиохронной цифровой иерархии* (PDH, или ПЦИ), представлены в табл. 10.1. Здесь и далее: АС — американская, ЯС — японская и ЕС — европейская система иерархий.

Особенности плеззиохронной цифровой иерархии. Метод мультиплексирования с чередованием октетов или байтов применяется только при формировании цифровых сигналов первого уровня с тем, чтобы иметь возможность идентификации байтов или групп байтов каждого из каналов в общем цифровом потоке. Поскольку общая синхронизация последовательностей на входе мультиплексора от разных абонентов/пользователей отсутствует, в схемах второго и последующих уровней мультиплексирования используется метод мультиплексирования с чередованием битов (но не байтов). Так, в этом случае мультиплексор второго уровня формирует выходную цифровую последовательность (со скоростью 6 Мбит/с — АС и ЯС или 8 Мбит/с — ЕС) путем чередования битов входных последовательностей от разных каналов (для АС и ЯС это каналы T1, а для ЕС — каналы E1).

Поскольку мультиплексор не формирует структуры для определения позиции бита каждого канала, а входные скорости разных каналов могут не отличаться, то используется внутренняя побитовая синхронизация. Тогда мультиплексор сам выравнивает скорости входных потоков добавлением в каналы с относительно меньшими скоростями передачи нужного числа *выравнивающих битов* (наиболее простой

вариант). Могут использоваться и другие варианты, когда выравнивание скоростей осуществляется изъятием некоторых служебных битов из каналов с большими скоростями, иногда сочетаются оба процесса добавления/изъятия. В результате на выходе мультиплексора формируется синхронизированная цифровая последовательность. Информация о вставленных/изъятых битах передается по служебным каналам, формируемым отдельными битами в общей структуре фрейма. На последующих уровнях мультиплексирования эта процедура повторяется с добавлением новых выравнивающих битов. Эти биты затем соответственно удаляются/добавляются при демultipлексировании на приемной стороне для восстановления исходной цифровой последовательности. Такой процесс передачи получил название *плеззиохронного* (т.е. почти синхронного), а цифровые иерархии АС, ЯС и ЕС соответственно название *плеззиохронных цифровых иерархий* (PDH).

Кроме процесса синхронизации на уровне мультиплексора второго порядка, происходит также формирование фреймов и мультифреймов, структурирующих последовательность в целом. Формирование структуры фреймов и мультифреймов и их выравнивание особенно важно для локализации на приемной стороне каждого фрейма. Это позволяет, в свою очередь, получить информацию о структуре сигнализации и кодовых группах контролирующих избыточных кодов CRC, а также выделить информацию служебного канала данных.

В случае применения адаптивной дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (АДИКМ) можно понизить скорость передачи одного речевого канала до 32 кбит/с, что приводит к повышению емкости каналов Т1 или Е1 с количеством несущих до 48 или 60 телефонных каналов. Современная техника сжатия цифровых данных позволила последовательно увеличить эти показатели сначала в 2 раза (до 16 кбит/с на речевой канал), а затем в 4 раза (8 кбит/с на канал) и, наконец, благодаря использованию техники кодирования с линейным предсказанием по кодовой книге, окончательно в 5 раз (6,4 кбит/с на канал).

Более важным результатом этого развития стало то, что PDH, несмотря на явную неоптимальность при передаче сигналов в сетях с пакетной коммутацией, стали транспортной основой для передачи данных, сосуществуя с новыми технологиями.

Рассмотрим структуру цифрового потока первого уровня европейской ветви плеззиохронной иерархии Е1 (Рекомендация G.732).

При передаче по первичной сети цифровой поток Е1 со скоростью 2048 кбит/с преобразуется в блоки стандартной логической структуры — циклы. Цикловая структура обеспечивает процедуры мульти-

плексирования и демультиплексирования, передачу управляющей информации, а также встроенную диагностику по параметру ошибок. Существует три основных варианта цикловой структуры E1: неструктурированный поток, поток с цикловой структурой и поток с цикловой и сверхцикловой структурой.

Неструктурированный поток E1 используется в сетях передачи данных и не имеет цикловой структуры, т.е. разделения на каналы (обычно это мультиплексирование ИКМ каналов со скоростью 64 кбит/с).

Поток E1 с цикловой структурой предусматривает разделение на 32 канала ИКМ по 64 кбит/с в форме разделения на каналные интервалы (Time Slot, TS) от 0 до 31. На каждый каналный интервал в составе цикла отводится по 8 битов, таким образом длина цикла равна 256 битам, что при заданной скорости передачи E1 составляет 125 мкс (длительность одного цикла). Нулевой каналный интервал отводится под передачу сигнала цикловой синхронизации FAS (Frame Alignment Signal).

Структура цикла FAS представлена на рис. 10.1. Согласно приведенным данным различаются четные и нечетные циклы. В TS0 нечетных циклов передается сигнал FAS, включающий последовательность цикловой синхронизации 0011011 и один служебный бит Si, зарезервированный под задачи международного использования.



Рис. 10.1. Структура сигналов FAS и NFAS

В TS0 четных циклов передается сигнал NFAS без кодовой последовательности цикловой синхронизации. В составе сигнала NFAS передается бит Si для международного использования, бит A для передачи сигналов о неисправностях, а также пять служебных битов Sn4, Sn5, Sn6, Sn7, Sn8 для передачи сигналов сетевого управления первичной сети E1, диагностики и дополнительных процедур контроля ошибок.

В отечественной терминологии вариант потока E1 с цикловой структурой носит название ИКМ-31. Он используется в ряде систем передачи данных, а также в некоторых приложениях ОКС7, ISDN и В-ISDN. В ряде случаев в аппаратуре передачи/приема E1 используется еще и шестнадцатый каналный интервал (TS-16) для информации о сигнализации, связанной с разговорным каналом.

В этом случае поток E1 имеет дополнительно к цикловой структуре еще и сверхцикловую структуру (Multi Frame Alignment Signal,

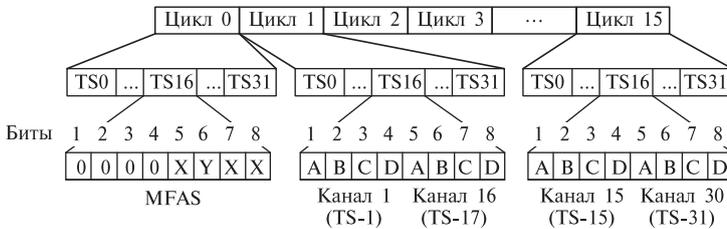


Рис. 10.2. Структура сигнала MFAS: X — запасные биты (1 обычно не используется); Y — удаленная неисправность MFAS (равно 1 при потере сверхцикловой синхронизации)

Таблица 10.2

Номер цикла	Цикловой синхро-сигнал	Сверх-цикловой сигнал (S-бит)	Номера битов в канальном интервале		Обозначение сигнального канала
			Для закодированного сигнала	Для сиг-нализации	
1	1	–	1–8		
	–	0	1–8		
3	0	–	1–8		
4	–	0	1–8		
5	1	–	1–8		
6	–	1	1–7	8	A
7	0	–	1–8		
8	–	1	1–8		
9	1	–	1–8		
10	–	1	1–8		
11	0	–	1–8		
12	–	0	1–7	8	B

MFAS). В отечественной терминологии такой вариант цикловой структуры E1 называется ИКМ-30. В этом случае 16 циклов объединяются в сверхцикл размером 4096 битов и длительностью 2 мс. При передаче/приеме информации в виде сверхциклов MFAS индивидуальная информация FAS каждого цикла теряет всякое значение и вся информация рассматривается в формате FAS как 16 циклов.

Первый цикл содержит информацию MFAS о сверхцикле в шестнадцатом канальном интервале, а остальные 15 интервалов используются для передачи сигнальной информации. Структура MFAS приведена на рис. 10.2.

В табл. 10.2 представлен один из двух, наиболее простых вариантов распределения F-бита суперцикла из 12 циклов.

Основные характеристики системы T1 (Рекомендация ITU-T G.733):

- Метод группообразования позначный
- Групповая скорость, кбит/с 1544

Скорости каналов, кбит/с	64
Число каналов	24
Код в каналах	восьмиэлементный. Кодирование речевого сигнала соответствует μ -закону согласно Рекомендации ITU-T G.711
Сигнализация	по общему каналу; по выделенным каналам
Канал группового тракта	цифровой тракт на 1544 кбит/с
Структура цикла:	
длина цикла, бит	193 (1 + 24×8)
первый бит цикла (F-бит)	синхронизация, контроль и передача данных

Система второго уровня предназначена для цифровых трактов обмена информацией между странами с первичной системой, использующей групповую скорость передачи 2048 кбит/с (в соответствии с Рекомендацией ITU-T G.732).

Метод группообразования	поэлементный с циклическим чередованием битов в порядке нумерации первичных систем
Групповая скорость	8448 кбит/с
Скорости передачи объединяемых первичных систем	2048 кбит/с
Число объединяемых первичных систем	4
Канал группового тракта	цифровой тракт на 8448 кбит/с
Длина цикла	848 битов
Число битов на первичную систему	206
Максимальная скорость выравнивания на первичную систему	10 кбит/с
Отношение максимальной скорости выравнивания к номинальной	2,36

Для выравнивания скоростей используется положительное цифровое выравнивание (положительный стаффинг) — управляемый процесс увеличения скорости передачи низкоскоростного сигнала путем введения символов выравнивания для согласования скорости низкоскоростного сигнала с групповой скоростью системы без потери информации.

Наряду с положительным существует и отрицательное цифровое выравнивание. Оно предназначено для уменьшения скорости передачи высокоскоростного сигнала путем удаления информационных символов и передачи их по отдельному низкоскоростному каналу, входящему в состав группового сигнала системы.

Максимальная скорость выравнивания — скорость введения выравнивающих символов при положительном выравнивании или удаления при отрицательном выравнивании информационных символов.

Номинальная скорость выравнивания — это такая скорость, с которой выравнивающие символы вводятся (или удаляются информационные символы при отрицательном выравнивании) при скорости

Таблица 10.3

Секция 1				Секция 2		Секция 3		Секция 4		
1–10	11	12	13–212	1–4	5–212	1–4	5–212	1–4	5–8	9–212
ЦС 1111010000	Y	Z	I_j	C_{j1}	I_j	C_{j2}	I_j	C_{j3}	W_j	I_j
Y — авария; Z — для национального использования; символы C_{ji} означают i -й символ сигнала управления выравниванием j -й первичной системы, $i = 1, 2, 3$, $j = 1, 2, 3, 4$; W_j — символ выравнивания j -й первичной системы; I_j — символ j -й первичной системы.										

передачи как низкоскоростных сигналов, так и группового сигнала при их номинальных значениях.

Структура цикла системы группообразования на 8448 кбит/с показана в табл. 10.3. Цикл из 848 битов разделен на четыре секции по 212 битов каждая, причем сами секции состоят из группы служебных символов и следующих за ними символов первичных систем (I_j), расположенных по методу поэлементного (посимвольного) чередования.

Аварийный сигнал (Y) передается при наличии повреждений в группообразующей аппаратуре символом 1, при отсутствии повреждений — символом 0.

Символы управления выравниванием (C_{ji}) располагаются группами по четыре в начале каждой секции. Управляющий сигнал каждой первичной системы расположен в трех секциях на одинаковых позициях; сигнал 111 означает функционирование операции цифрового выравнивания, а 000 — ее отсутствие.

10.2. Проблемы использования технологии АТМ в спутниковых системах связи

Сущность режима АТМ состоит в транспортировании всех видов информации пакетами фиксированной длины (ячейками), когда потоки ячеек от различных пользователей асинхронно мультиплексируются в едином цифровом тракте. В качестве протокольной единицы в АТМ принят пакет фиксированной длины, включающий заголовок (5 октет) и информационное поле (48 октет). Применение коротких пакетов (53 октета), минимизация функций, выполняемых при коммутации, и использование элементной базы на современных технологиях позволило уже сегодня достичь производительности коммутаторов АТМ 10 Гбит/с и более.

Основными положительными сторонами метода АТМ являются возможности транспортирования по сети информации любой службы независимо от скорости передачи, требований к семантической и временной прозрачности сети и пачечности трафика ячеек.

Сети АТМ свободны от недостатков сетей с другими режимами переноса (зависимость от службы, отсутствие гибкости, низкая эффективность использования сетевых ресурсов, отсутствие адаптации к источникам с изменяющейся скоростью передачи).

Несмотря на то что АТМ-технология изначально была предназначена для широкополосных сетей со скоростями передачи информации 155 и 622 Мбит/с, непрерывно возрастает интерес к использованию принципов АТМ в каналах с меньшей пропускной способностью, например 1,544 Мбит (T1). Это обстоятельство стимулируется двумя основными причинами:

- высокой стоимостью или отсутствием достаточных связных ресурсов;
- отсутствием пользователей или информационных услуг, требующих более высокой пропускной способности каналов связи.

В гражданской и военной сферах деятельности существует большое число приложений, требующих беспроводной связи между территориально рассредоточенными пользователями. Поэтому разработка принципов построения, исследование характеристик и эффективности спутниковых сетей связи, использующих принципы АТМ как средства рационального коллективного использования связных ресурсов сети при предоставлении различных информационных услуг, является весьма актуальной задачей.

Спутники связи нового поколения разрабатываются с целью обеспечения широкого спектра информационных услуг, включая передачу речи, текста, изображений, видео и самых разнообразных данных. Совместная передача различных видов трафика, предъявляющих разные и часто весьма жесткие и противоречивые требования к качеству обслуживания информационных потоков, предопределяет использование метода пакетной передачи, при котором сообщения пользователей структурируются в пакеты (ячейки) фиксированного объема. Потоки пакетов от разных пользователей на входах каналов связи статистически мультиплексируются, что при пульсирующем входном трафике обеспечивает более экономное использование связных ресурсов сети по сравнению, например, с методом коммутации каналов, при котором связные ресурсы сети выделяются пользователем по требованию, исходя из их пиковых (максимально возможных) потребностей.

Спутниковые каналы связи являются относительно недорогой (особенно с учетом стоимости развертывания) и гибкой альтернативой используемым в наземных сетях АТМ кабельным и волоконно-оптическим каналам.

Можно выделить следующие три аспекта использования спутниковых каналов:

а) спутниковые каналы в качестве расширения интерфейса между пользователями и сетью (User Network Interface, UNI). В данном приложении спутниковые каналы дают возможность включить в сеть пользователей, расположенных в труднодоступных и малонаселенных районах. Такой подход весьма актуален применительно к территории России, характеризующейся слабо и чрезвычайно неравномерно развитой инфраструктурой наземных высокоскоростных каналов связи;

б) спутниковые каналы в качестве мостов, объединяющих региональные сети в глобальную (национальную) сеть;

в) спутниковые каналы в качестве 100%-ной альтернативы наземным каналам связи. В данном приложении спутник-ретранслятор (СР) должен обязательно выполнять не только связные функции, но и функции более высоких иерархических уровней сети.

Последний подход является наиболее общим и охватывает круг проблем, возникающих при других подходах, поэтому в дальнейшем (если не оговорено особо) сконцентрируем внимание именно на использовании СР в качестве интеллектуального АТМ-узла (коммутатора) сети, выполняющего целый ряд функций канального и сетевого уровней.

Обязательным условием выполнения этих функций является возможность бортовой обработки сигналов (демодуляции и декодирования сигналов, поступающих по каналам ЗС – СР, обработки видеосигналов в соответствии с заданными протоколами сетевого и канального уровней, кодирования и модуляции радиосигналов при передаче по каналам СР – ЗС). При пакетной передаче требуется «быстрый» бортовой коммутатор коротких пакетов — АТМ-коммутатор.

Успехи космической технологии в принципе позволяют выполнить это условие. Разработаны спутники ретрансляторы с требуемыми коммутационными возможностями обеспечивающие непосредственную связь с пользователями (минуя промежуточные наземные коммуникационные сети).

Использование геостационарных спутников ретрансляторов обеспечивает большую зону обслуживания (зону видимости). Топология сети при этом оказываемся чрезвычайно простой (радиальной), что отодвигает на второй план одну из ключевых проблем АТМ-технологии — проблему маршрутизации при установлении соединения. Зато в силу специфики спутниковых каналов связи значительно усложняются задачи, связанные с реализацией других базовых принципов

АТМ — статистического мультиплексирования и управления информационными потоками с целью обеспечения требуемого качества обслуживания.

К спутникам ретрансляторам в составе сети АТМ предъявляются следующие требования:

- необходимость использования многолучевых приемо-передающих бортовых антенн как средства обеспечения требуемой для интегрированного обслуживания высокой пропускной способности при разумно приемлемом и технически реализуемом уровне энергозатрат;
- необходимость бортовой обработки (демодуляции-модуляции сигналов) как средства обеспечения многолучевого режима передачи на направлении «борт – Земля» и оптимизации структуры передаваемых сигналов;
- необходимость использования на борту СР быстродействующих коммутаторов пакетов (АТМ-коммутаторов) как технического средства совместной передачи разнородного трафика с удовлетворением существенно различающихся требований к вероятностно-временным характеристикам качества обслуживания.

Более высокая вероятность ошибки в спутниковых системах ($p = 10^{-7}$) по сравнению с волоконно-оптическими системами ($p = 10^{-10}$) порождает при передаче АТМ-ячеек ряд проблем. Решение проблемы достоверности передачи состоит в объединении ячеек в субкадры и кодировании этих субкадров как отдельных блоков избыточными помехоустойчивыми кодами. В некоторых случаях предлагается объединять ячейки в субкадры длиной порядка 5000 битов и использовать циклический код с 32 проверочными символами, что позволяет свести вероятности потери и ошибочного приема ячейки к приемлемому уровню.

Для борьбы с пакетными ошибками, характерными для каналов, использующих внутреннее помехоустойчивое кодирование (в качестве таких кодов в спутниковых каналах обычно используются непрерывные сверточные коды, позволяющие ценой расширения полосы частот снизить энергозатраты и соответственно стоимость наземного и космического сегментов системы связи), предложены методы чередования (перемежения) символов, обеспечивающих декорреляцию ошибок и позволяющие без дополнительных информационных затрат повысить эффективность использования внешних блоковых кодов.

Определенные сложности вызывает малый размер пространства, выделенный под номер ячейки (4 бита), что при использовании решающей обратной связи для повторной передачи ячеек с обнаруженными

ми ошибками позволяет одновременно находиться в канале не более 16–24 ячеек. Это при задержке, обусловленной большой протяженностью канала и равной примерно 0,25 с, ограничивает максимальную пропускную способность канала значением всего около 50 кбит/с. Для решения этой проблемы в субкадрах предлагается резервировать под номер 16 битов, что достаточно для реальных пропускных способностей спутниковых каналов даже при многоскачковой передаче.

Таким образом, первый круг возникающих проблем связан с несоответствием форматов АТМ-ячеек (выбранных из расчета использования ВОЛС, относительно малопротяженных наземных каналов связи, многоузловых сетей) характеристикам спутниковых каналов. Поскольку технология транспортировки информационных символов по спутниковым каналам достаточно хорошо проработана, то решение этих проблем особой сложности не представляет. В соответствии с концепцией АТМ установление соединения происходит в результате «трафик-контрактов» между пользователями и сетью. Пользователь сообщает узлу доступа в сеть тип трафика, который он намерен передавать, и его характеристики. Эти характеристики последовательно передаются от узла к узлу сети. Каждый узел с использованием алгоритмов управления установлением соединения оценивает по характеристикам заявленного трафика возможность установления нового соединения и обеспечения требуемых характеристик качества обслуживания. Если новое соединение установлено, характеристики передаваемого пользователем трафика непрерывно анализируются с целью выявления их соответствия заявленным при заключении «трафик-контракта».

К сожалению, несмотря на то что предложено большое количество алгоритмов управления установлением соединения и контроля параметров пользовательского трафика, удовлетворительное решение до сих пор не найдено. Идея «чистого» статистического мультиплексирования, положенная в основу концепции АТМ, встречает значительные трудности практической реализации в связи с тем, что:

- пользователь часто не в состоянии предсказать статистические характеристики собственного трафика;
- анализ и контроль характеристик пользовательского трафика резко усложняется по мере расширения и уточнения его характеристик;
- правила распределения ресурсов сети между пользователями должны учитывать наличие в сети одновременно большого числа разнородных информационных потоков, требующих различного

качества обслуживания, что чрезвычайно сложно даже с точки зрения чистой теории.

Отсутствие удовлетворительных практических результатов привело к тому, что ресурсы сети распределяются между пользователями, исходя из их пиковых требований к скорости передачи. Неизбежное в этом случае снижение использования пропускной способности каналов связи во многих случаях не представляет интереса и игнорируется. Это во многом относится к наземным локальным АТМ-сетям, использующим ВОЛС и имеющим явный избыток пропускной способности. Что касается спутниковых сетей связи, то их пропускная способность является весьма дорогостоящим ресурсом и ограничена современным уровнем развития технологии. Поэтому в этих сетях вопросы рационального распределения ресурсов между пользователями с максимальным использованием априорной и текущей информации о характеристиках их трафика являются весьма актуальными. С другой стороны, топологические свойства спутниковых сетей чрезвычайно просты, а это делает возможным установление достаточно строгого соответствия между показателями качества обслуживания и статистическими характеристиками пользовательского трафика. Знание этого соответствия позволяет разработать конкретные правила распределения связанных ресурсов, максимизирующие использование пропускной способности сети и, соответственно, ее производительность и экономическую эффективность. Это делает актуальным решение задачи анализа характеристик качества обслуживания информационных потоков пользователей.

АТМ является транспортной технологией, призванной обеспечить разнообразие информационных услуг. Использование статистического мультиплексирования разнородных информационных потоков позволяет более экономно использовать связанные ресурсы сети, но одновременно приводит к возможности возникновения информационных перегрузок, когда текущее значение нагрузки на сеть превышает ее пропускную способность. Управление перегрузками (их предотвращение и возможно более быстрое устранение возникших перегрузок) является одной из ключевых проблем АТМ-технологий. В наземных сетях эта проблема решается путем управления информационными потоками. Под процедурами управления потоками обычно понимаются правила допуска внешнего трафика в сеть. Очевидно, что нельзя разрешать бесконтрольный допуск в сеть всего предлагаемого пользователями трафика, так как это может привести к тяжелым информационным перегрузкам и блокировкам всей сети в целом.

Поскольку трафик поступает в сеть извне, а перегрузки чаще всего возникают внутри сети, то для эффективного управления потоками необходима надежная и оперативная обратная связь от внутренних узлов сети к узлам доступа.

В спутниковых АТМ-сетях основная проблема управления потоками возникает в связи с большим временем распространения сигналов. Земная станция получает информацию о текущем состоянии аппаратуры ретранслятора с опозданием на 0,125 с. Если станция имеет канал с пропускной способностью C , то за это время будет передано $(C \times 0,125)/(8 \times 53)$ АТМ-ячеек. Если, например, $C = 2$ Мбит/с, то станция успеет бесконтрольно передать 600 ячеек, возможно усугубляющих перегрузку. Удовлетворительное решение проблемы большой инерционности замкнутого контура управления информационными потоками пока не предложено.

Таким образом, для адаптации основных принципов АТМ-технологии к спутниковым сетям связи необходимо решение в первую очередь следующих задач:

- разработка и исследование методов анализа показателей качества информационного обслуживания различных видов трафика в различных сечениях сети;
- разработка методов управления перегрузками в спутниковых сетях и оценка их эффективности и практической реализуемости.

Вопросы к главе 10

1. Какие цифровые потоки объединены под термином плезиохронная цифровая иерархия PDH?
2. Какова скорость цифрового потока первого уровня E1 европейской ветви PDH?
3. Какова длительность кадра потока E1?
4. Сколько ИКМ каналов передается в потоках E1 и T1?
5. В чем сущность цифрового выравнивания при формировании потоков PDH?
6. В чем сущность режима АТМ?
7. Какие требования предъявляются к спутникам ретрансляторам в составе сети АТМ?
8. Какие изменения структуры ячеек АТМ в спутниковых сетях предлагаются для решения проблемы достоверности?
9. Какова основная особенность управления потоками в спутниковых сетях АТМ?

11 Цифровое спутниковое телевизионное вещание

В настоящее время широкое распространение получило в мире телевизионное вещание посредством его передачи через спутниковые ретрансляторы на ГСО, в том числе непосредственно на малогабаритные антенны индивидуальных потребителей.

В зависимости от организации спутниковое ТВ вещание может осуществляться двумя следующими службами.

Фиксированная спутниковая служба (ФСС). В этом случае передаваемые через КА телевизионные сигналы принимаются с высоким качеством наземными станциями, расположенными в фиксированных, заранее определенных пунктах. С этих станций через наземные ретрансляторы или кабельные сети телевизионный сигнал доставляется индивидуальным потребителям.

Радиовещательная спутниковая служба (РСС). В этом случае ретранслируемые КА телевизионные программы предназначены для непосредственного приема населением. Непосредственным считается как индивидуальный, так и коллективный прием, при котором телезрители принимают программу по кабельной сети. Данная служба в настоящее время получила широкое распространение, поскольку пользователи могут принимать программы телевидения в местах с неразвитой инфраструктурой при помощи простых и недорогих антенн и спутниковых ресиверов небольших размеров.

Для передачи со спутника в сторону земной поверхности используются диапазоны частот С, Ku, и в настоящее время осваивается Ka-диапазон.

11.1. Основные системы цифровой передачи многопользовательского телевидения

В настоящее время разработаны три цифровые спутниковые системы цифровой передачи многопользовательского телевидения (МПТВ): DVB-S, DSS и GI MPEG-2, получившие условное обозначение А, В и С соответственно. Эти системы рекомендованы МСЭ-Р для практического применения при внедрении спутниковых служб МПТВ [33].

Система А (DVB-S) утверждена Европейским институтом стандартизации в области электросвязи (ETSI), создана в Европе в рамках проекта цифрового видеовещания (Digital Video Broadcasting, DVB).

В этой системе используются алгоритм кодирования сигналов изображения и звукового сопровождения, соответствующий основным профилю и уровню стандарта MPEG-2, и алгоритм транспортного мультиплексирования этого стандарта [34]. Совместное использование упреждающей коррекции ошибок (FEC) для канала на базе кода Рида–Соломона и сверточного кода, а также алгоритма декодирования Витерби с «мягким» решением обеспечивает высокое качество радиочастотных характеристик системы в условиях тепловых шумов и интерференционных помех. Имеется возможность выбора, в том числе и автоматического, одного из пяти дискретных значений кодовой скорости $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$, $7/8$, позволяющего получать оптимальное соотношение между эффективностью использования спектра и мощностью излучения. В системе применяются фильтры с характеристиками типа «приподнятый косинус», квадратурная фазовая манипуляция QPSK и когерентное детектирование принимаемого сигнала. Скорость передачи символов данных может выбираться оператором с целью оптимального использования полосы частот спутникового транспондера. В настоящее время в дополнение к стандарту DVB-S широкое распространение получают системы второго поколения (DVB-S2) для видеовещания HD качества, интерактивных услуг, сбора новостей и других широкополосных спутниковых приложений.

Система В (DSS) разработана в 1994 г. и была первой в США системой непосредственного спутникового вещания. В 1996 г. система была внедрена и в ряде других стран региона в диапазоне частот спутников фиксированных служб диапазона 11/12 ГГц и транспондеров с полосой пропускания 24 МГц.

Система С (GI MPEG-2) является цифровой системой непосредственно спутникового вещания, получившей широкое распространение в США. В ней применено мультиплексирование цифровых сигналов ТВ и радиовещания с использованием временного разделения каналов (Time-Division Multiplexing, TDM). В функции системы С включено восстанавливаемое управление доступом к информации, предоставление платных услуг по заказу и услуг по передаче данных. Предусмотрены виртуальные каналы для упрощения поиска пользователями интересующих их программ и каналов вещания.

Несмотря на то что стандарты МПТВ имеют различия, все они используют общие принципы, типичные для современных спутниковых систем связи. К ним относятся использование модуляции QPSK, на-

личие внутреннего (сверточного) и внешнего (Рида–Соломона) кодирования, применение аддитивного скремблирования и перемежения, пакетная организация передачи трафика [35].

В целях содействия разработке универсального приемника, декодирующего сигналы различных спутниковых систем в регионах, где используются одновременно несколько систем, 11-й Исследовательской комиссией МСЭ-Р подготовлена Рекомендация по общим функциональным требованиям к приему цифровых сигналов МПТВ, передаваемых с помощью спутников диапазона рабочих частот 11/12 ГГц. В ней анализируются общие и специфические элементы МПТВ систем А, В и С и рассматривается возможность использования универсальных элементов в интегральных декодерах соответствующих сигналов, встроенных в абонентские приемники. Анализ основан на обобщенной эталонной модели декодера, в которой предусмотрены следующие уровни:

- физический и канальный уровни, относящиеся к типовым элементам и функциям тюнера: QPSK-демодулятор, сверточное кодирование, деперемежение, декодирование кода Рида–Соломона и устранение дисперсии энергии;
- транспортный уровень демультиплексирования сигналов различных программ ТВ вещания и отдельных компонент программ, а также депакетирование других видов информации (видео, звук, телетекст и данные);
- уровень ограниченного доступа, управляющий функциями внешнего декодера или универсального интерфейса (устройства взаимодействия системы с пользователем и другими внешними объектами);
- сетевой уровень, обеспечивающий декодирование звуковых и видеосигналов, а также управление электронным руководством по программам, служебной информацией и декодированием данных;
- уровень представления, ответственный за интерфейсы пользователей, функционирование системы дистанционного управления и т. п.;
- прикладной уровень, в функции которого входят различные применения информации в виде изображений, звука и данных.

11.2. Особенности обработки сигналов DVB-S на физическом и канальном уровне

На рис. 11.1 показана обобщенная схема обработки сигнала в приемной системе DVB-S, а также блок-схема технических средств приема

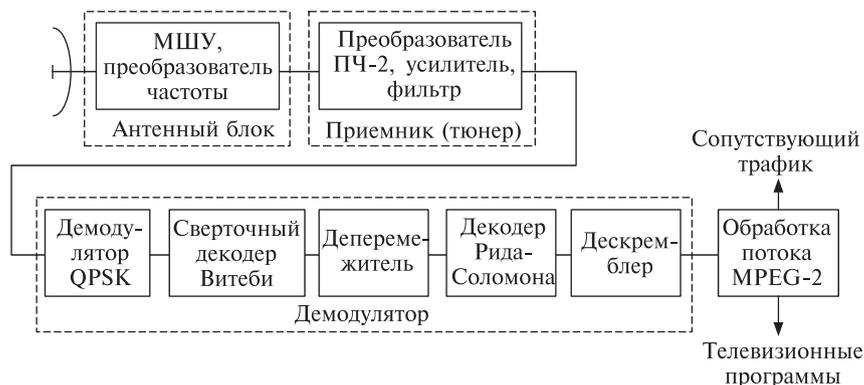


Рис. 11.1. Блок-схема устройства для приема спутникового телевидения

спутникового телевидения. Рассмотрим особенности функционирования этого оборудования.

Блок преобразователя и антенна. Тип антенны, обычно однозеркальной с вынесенным облучателем небольшого диаметра, зависит от положения абонента в зоне обслуживания транслирующего спутника и плотности потока его мощности. Так, например, надежный прием телевидения со спутника EUTELSAT HOTBIRD 3 в Санкт-Петербурге возможен с антенной диаметром 0,6 м; в Москве — с 0,8 м, а в Алма-Ате на антенну с диаметром менее 1,2 м прием уже невозможен.

Блок маломощного усилителя-преобразователя (МШУ-Пр), или конвертер — один из наиболее важных узлов приемного устройства, в состав которого входят четыре основных функциональных узла:

- маломощный двух- или трехкаскадный усилитель (МШУ), обеспечивающий суммарный коэффициент усиления 25...30 дБ;
- смеситель преобразователя частоты на полупроводниковом диоде или арсенидгаллиевом полевом транзисторе;
- гетеродин со стабилизацией частоты кварцевым резонатором;
- усилитель первой ПЧ с коэффициентом усиления 30...35 дБ;

Приемник, демодулятор и декодер. При передаче излучаемый телевизионный сигнал формируется в спутниковом модеме, поддерживающем стандарт DVB-S, например в модемах Radyne Comstream, EFData, Paradise.

Прием сигнала может осуществляться несколькими возможными способами с применением:

- высокоскоростного спутникового модема с дальнейшей обработкой демодулированного сигнала на ПЭВМ в нереальном масштабе времени. Сложность обработки зависит от функциональных воз-

возможностей модема в части декодирования, дескремблирования, дегерметизации;

- телевизионного приемника — тюнера (фирм Tadiran, Scorpus, Paradise, Hughes Network Systems, Samsung и других);
- различных PCI-плат типа SkyMedia, PentaMedia, LuckyLincDVB, ViaSky, SkyStar в составе персонального компьютера.

Общим узлом данного оборудования является цифровой приемник, который должен содержать следующие основные модули:

- собственно приемник;
- QPSK-демодулятор;
- сверточный декодер алгоритма Витерби;
- дегерметизатор $I = 12$, $M = 17$, алгоритм Форнея;
- декодер Рида-Соломона (204, 188, $T = 8$);
- пакетный аддитивный дескремблер (14, 15).

РПУ — тюнер состоит из нескольких узлов, соответствующих всем требованиям для приема системы DVB. Эти тюнеры используют на входе полосу частот ПЧ1, равную 0,95...2,05 ГГц (L-диапазон) при уровне сигнала $-60...-90$ дБВт.

Выбор второй промежуточной полосы ПЧ2 определяется требованиями защиты от помех по зеркальному каналу и возможностями простой реализации схемотехнических решений при минимальной стоимости и высокой технологичности.

Применение в импортной аппаратуре транзисторных смесителей обеспечивает хорошее подавление интермодуляционных составляющих, равномерную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Для уменьшения относительной полосы перестройки частота гетеродина выбирается выше частоты сигнала и располагается в диапазоне частот от $(0,95 + f_{пч2})$ до $(2,05 + f_{пч2})$ ГГц.

Выходной сигнал поступает далее на вход полосового фильтра, выделяющего после ПЧ2 сигнал с частотой 479,5 МГц. Этот фильтр выполняет функцию защиты от помех по соседнему каналу, формирует полосу пропускания с требуемой избирательностью при сохранении равномерности АЧХ и линейности фазовой частотной характеристики (ФЧХ).

Демодулятор QPSK (ФМ-4). Основным видом модуляции в стандарте DVB-S является ФМ-4 (QPSK), однако в отдельных случаях при ограниченном частотном ресурсе могут использоваться ФМ-8 и даже КАМ-16 (для перевозимых репортажных станций).

Сверточный декодер. В системе DVB-S применяется один из стандартных перфорированных сверточных кодов, упомянутых в гла-

Таблица 11.1

Селектор	Кодовая скорость перфорированного кода				
	$R = 1/2$	$R = 2/3$	$R = 3/4$	$R = 5/6$	$R = 7/8$
P	1	10	101	10101	1000101
Q	1	11	110	11010	1111010

ве 6, реализуемых несистематическим кодером со скоростью $R = 1/2$ и образующими полиномами 133_8 ; 171_8 (см. рис. 6.11).

Рабочая кодовая скорость определяется конфигурацией перфоратора в виде селектора P и селектора Q. В табл. 11.1 при описании селекторов символ 1 означает, что бит информации передается, символ 0 — бит исключается («выкалывается», не передается).

Устройство сверточного перемежения. Функциональная схема устройства перемежения/деперемежения показана на рис. 11.2.

Процесс сверточного перемежения основан на алгоритме Forney, совместимом с алгоритмом Ramsey типа II при $I = 12$. Цикл с перемежением состоит из пакетов данных длиной 204 байта, из которых один байт синхронизации, 16 байтов проверочной информации после кодирования Рида–Соломона и 188 байтов полезной информации, включая 4-байтный заголовок и 184 байта данных.

Перемежитель может содержать $I = 12$ ветвей данных, циклически подключаемых ко входу с помощью коммутатора. Каждая из ветвей представляет собой регистровую память из $M \times j$ ячеек емкостью 1 байт, где $M = 17 = N/I$, $N = 204$ — длина цикла с защитой от ошибок, $I = 12$ — глубина интерливинга, j — индекс ветви. На входе и выходе памяти используются синхронные коммутаторы.

Для синхронизации инвертированные и неинвертированные синхробайты подаются в ветвь с индексом 0, соответствующую нулевой задержке. Устройство деперемежения несколько проще, чем схема перемежения, и отличается обратной индексацией ветвей, т. е. $j = 0$ соответствует наибольшей задержке. Синхронизация устройства обеспечивается подачей первого же выделенного синхробайта в ветвь с индексом 0.

Декодер кода Рида–Соломона. Кодеры на основе кода Рида–Соломона (РС-кодеры) обеспечивают кодирование данных с помощью укороченных кодов Рида–Соломона (204, 188, $T = 8$) и (146, 130, $T = 8$). Укороченные коды РС можно получить добавлением дополнительных нулевых 51-го или 109-го байтов для кодов соответственно (204, 188) и (146, 130) в тракт до поступления информационных байтов на вход кодера (255, 239). Эти нулевые байты отбрасываются по окончании процедуры РС-кодирования. Код РС (204, 188), $m = 8$ с

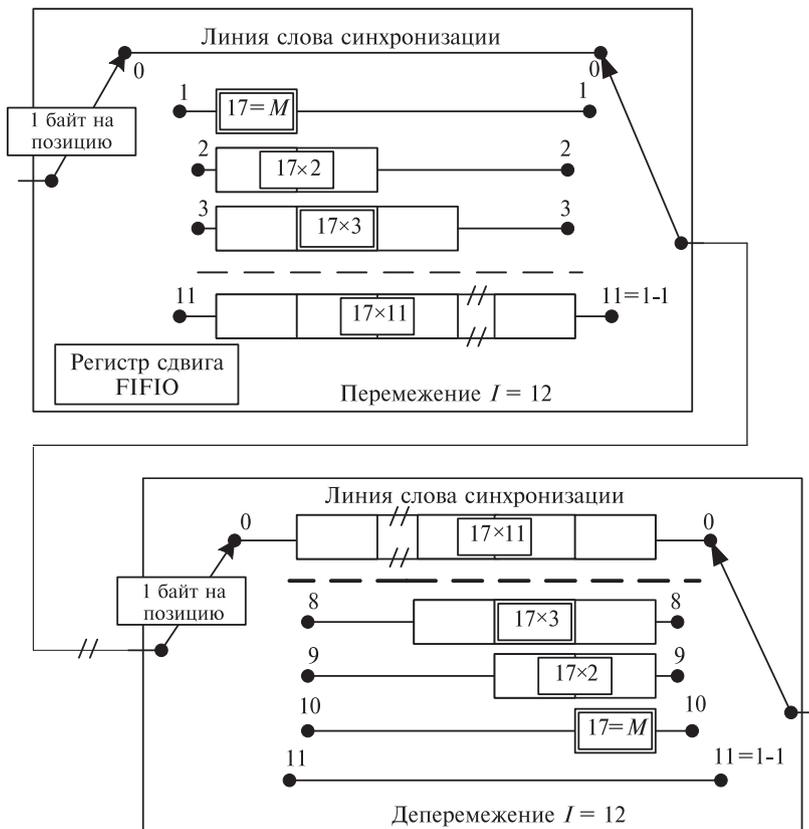


Рис. 11.2. Функциональная схема перемежителя/деперемежителя

восьмибитовыми символами, полученный путем укорочения блока из 256 символов, может исправлять до $t = 8$ ошибок на блок.

Параллельно-последовательное преобразование битов данных в символы осуществляется с помощью регистра сдвига. Регистр формирует младший разряд символа на основе бита, поступающего на вход в данный момент, а его старший разряд формируется с использованием бита, полученного в результате сдвига информации слева направо.

Дескремблер. Устранение дисперсии энергии в системе производится после декодирования данных в коде РС с использованием генератора двоичной псевдослучайной последовательности (ПСП) с генераторным полиномом $1 + x^{14} + x^{15}$ и начальной установкой при подаче последовательности 100101010000000.

Для удовлетворения требованиям Радиорегламента МСЭ и гарантии необходимых изменений уровней двоичного сигнала данные на

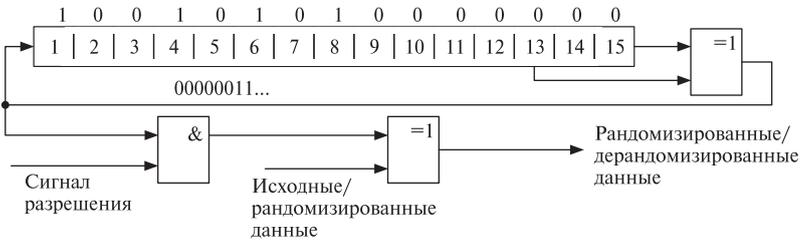


Рис. 11.3. Схема рандомизации двоичного сигнала на входе мультиплексора

входе мультиплексора стандарта MPEG-2 должны быть рандомизированы в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 11.3.

При начальной загрузке регистра-формирователя ПСП иницируется начало каждого восьмого транспортного пакета данных. В целях формирования сигнала инициализации дескремблера синхробайт первого транспортного пакета в группе из восьми пакетов поразрядно инвертируется с изменением своего значения с 47 на В8 (в шестнадцатичном представлении). Такой процесс в стандарте MPEG-2 называется адаптацией транспортного мультиплексирования.

Первый бит на выходе формирователя ПСП используется в качестве первого (старшего) значащего бита первого байта данных, расположенного после инвертированного синхробайта В8. Для обеспечения других функций синхронизации формирователь ПСП продолжает действовать и во время прохождения синхробайтов MPEG-2 в виде субпоследовательности из семи транспортных пакетов, однако при этом его выход отключается, чтобы оставить данные байты нерандомизированными. Таким образом получается, что период ПСП равен 1503 байтов.

После дескремблирования на выходе получается деперемеженный, декодированный и дескремблированный суммарный транспортный поток (TS), который впоследствии разбивается на элементарные потоки одного адресата (ES).

Формат заголовка пакета транспортного потока данных. Прямой транспортный цифровой поток по стандарту MPEG представляет собой непрерывную последовательность пакетов длиной 188 байтов с заголовками (4 байта) и полезной информацией (184 байта) [36].

Формат заголовка пакета транспортного потока данных представлен в табл. 11.2.

После обработки данного потока и выделяются пакеты с одинаковым идентификатором (PID), в результате чего формируется элементарный поток (ES) одного пользователя. Идентификатор PID закрепляется за пользователем и назначается провайдером. В форме эле-

Таблица 11.2

Поле	Длина, бит	Описание
Байт синхронизации	8	Синхробайт пакета 0×47
Индикатор ошибки передачи	1	0 — отсутствие ошибок; 1 — наличие цифровых ошибок на приеме
Индиктор начала блока полезной нагрузки	1	1 — начало пакета ТП соответствует первому байту PES пакета; 0 — в данном пакете ТП начала пакета PES нет
Приоритет передачи	1	Зарезервирован и имеет нулевое значение
PID (Идентификатор пакета)	13	Для систем КТВ значение 0×1FFE, для остальных: 0–31 — служебные; 32–8190 — полезная нагрузка; 8191, 8192 — стаффинг
Управление скремблированием передачи	2	Зарезервировано
Управление полем алаптации	2	Значение 01 указывает на запрещение пользованием полем адаптации
Счетчик непрерывности	4	Указывает на работу циклического счетчика в пределах данного PID (0×00–0×F)

ментарного потока ES могут передаваться телевизионные, звуковые, служебные или сопутствующие данные.

11.3. Стандарт DVB-S2. Система цифрового ТВ вещания второго поколения

Стандарт системы второго поколения DVB-S2 для видеовещания, интерактивных услуг, сбора новостей и других широкополосных спутниковых приложений является дополнением к широко используемому стандарту DVB-S. Новый стандарт разработан консорциумом DVB Project (Digital video Broadcasting Project — Проект цифрового видеовещания) — организацией, занимающейся разработкой стандартов в области цифрового телевидения для Европы. Стандарт детально исследован Совместным техническим комитетом (Joint Technical Committee, JTC) Европейского союза радиовещания (European Broadcasting Union, EBU), Европейским комитетом по электротехнической стандартизации CENELEC и Европейским Институтом телекоммуникационных стандартов (European Telecommunications Standards, ETSI).

DVB-S2 — это спецификация DVB для широкополосных SAT применений второго поколения, разработанная на базе отработанных технологий DVB-S и DVB-DSNG (Digital Satellite News Gathering — цифровая спутниковая видеожурналистика). Под DSNG обычно понимают передвижные системы передачи телевизионной информации с мест событий, именуемые системами сбора новостей. Система DVB-S2 разрабатывалась в основном для:

- услуг телевизионного вещания стандартной четкости (SDTV) и телевидения высокой четкости (ТВЧ или HDTV);
- интерактивных услуг, включая доступ в Интернет;
- профессиональных приложений.

Для всех этих приложений стандарт DVB-S2 использует последние научные и технические достижения как в области модуляции, так и кодирования, что позволяет увеличить пропускную способность примерно на 30 % и более по сравнению с DVB-S. В пределах передаваемого потока данных может использоваться широкий набор адаптивного кодирования, модуляции и уровней защиты от ошибок (зависящих от скорости кодирования). Посредством реверсного канала, для которого может быть использован любой физический канал, включая и телефонные линии, информирующего передатчик о фактических условиях приема, можно оптимизировать параметры передачи для каждого индивидуального пользователя в режиме вещания «точка–точка».

Для реализации компромисса между излучаемой мощностью и спектральной эффективностью в DVB-S2 предусматривается расширенный набор скоростей кодирования (1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10) при различных видах модуляции (QPSK, 8-PSK, 16-APSK и 32-APSK). Скорости кодирования 1/4, 1/3 и 2/5 введены для работы в комбинации с модуляцией QPSK для худших условий связи, когда уровень сигнала ниже уровня шума.

Форматы QPSK и 8PSK предлагаются для работы с приложениями вещания и могут использоваться в спутниковых транспондерах в режиме работы, близком к насыщению. Формат 32-APSK предназначен для линейного режима работы транспондера и требует повышенных значений отношения сигнала к шуму. Поэтому он, как правило, используется для профессиональных приложений, хотя и является самым широкополосным. Формат 16-APSK при ограниченных требованиях к линейности транспондера использует специальные схемы предискажений и может использоваться в передаче широкого набора приложений, включая ТВ вещание. Форматы модуляции 16-APSK и 32-APSK оптимизированы для работы в нелинейном режиме транспондера выбором мест размещением точек значений амплитуд на окружностях диаграмм (рис. 11.4 и 11.5).

Рабочие характеристики этих видов модуляции на линейном канале совместимы с традиционными форматами 16-QAM и 32-QAM соответственно.

Благодаря выбору вида модуляции и скоростей кодирования может быть достигнута эффективность использования спектра от 0,5 до

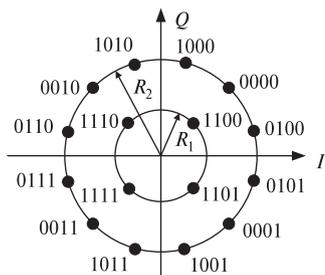


Рис. 11.4. Сигнальная диаграмма модуляции 16-APSK

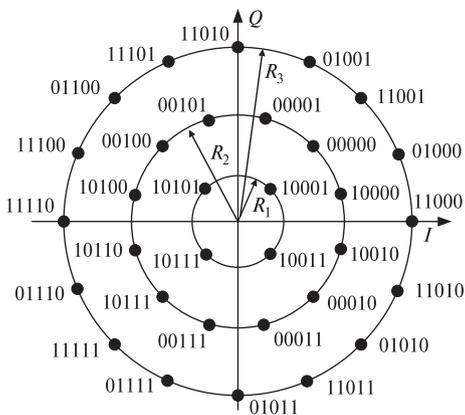


Рис. 11.5. Сигнальная диаграмма модуляции 32-APSK



Рис. 11.6. Сравнение помехоустойчивости и спектральной эффективности систем DVB-S и DVB-S2

4,5 бит/с/Гц. На рис. 11.6 приведены графики сравнения помехоустойчивости и спектральной эффективности систем DVB-S и DVB-S2 при различных сочетаниях видов модуляции и скоростей кодирования. Числовые данные по DVB-S2 приведены в табл. 11.3.

В DVB-S2 предусмотрено три коэффициента скругления спектра (фактор rolloff, см. п. 6.1.8): $r = 0,35$, как и в DVB-S, $r = 0,25$ и $r = 0,2$ — приближение к прямоугольной форме. Это дополнительно увеличивает пропускную способность, однако предъявляет высокие требования к линейности тракта транспондера.

Системные исполнения DVB-S2. Система DVB-S2 может использоваться в конфигурациях «одна несущая в транспондере» или «много несущих в транспондере». Максимальное число предоставляемых услуг может быть ограничено как полосой транспондера и требуемой скоростью передачи каждой из предоставляемых услуг, так и допустимым уровнем взаимных помех между соседними несущими.

Таблица 11.3

Режим	Спектральная эффективность	Идеальное E_s/N_0 , дБ, для FEC фрейма длиной 64800 битов
QPSK 1/4	0,49	-2,35
QPSK 1/3	0,66	-1,24
QPSK 2/5	0,79	-0,3
QPSK 1/2	0,99	1
QPSK 3/5	1,19	2,23
QPSK 2/3	1,32	3,1
QPSK 3/4	1,49	4,03
QPSK 4/5	1,59	4,68
QPSK 5/6	1,65	5,18
QPSK 8/9	1,77	6,2
QPSK 9/10	1,79	6,42
8-PSK 3/5	1,78	5,5
8-PSK 2/3	1,98	6,62
8-PSK 3/4	2,23	7,91
8-PSK 5/6	2,48	9,35
8-PSK 8/9	2,65	10,69
8-PSK 9/10	2,68	10,98
16-APSK 2/3	2,64	8,97
16-APSK 3/4	2,97	10,21
16-APSK 4/5	3,17	11,03
16-APSK 5/6	3,3	11,61
16-APSK 8/9	3,52	12,89
16-APSK 9/10	3,57	13,13
32-APSK 3/4	3,7	12,73
32-APSK 4/5	3,95	13,64
32-APSK 5/6	4,12	14,28
32-APSK 8/9	4,4	15,69
32-APSK 9/10	4,45	16,05

Для режимов APSK (режимов с амплитудной и фазовой модуляциями) возможно введение предискажений на передающей стороне. Это позволит использовать каскад бортовых усилителей мощности в режиме, близком к насыщению. Такой прием позволяет увеличить выходную мощность бортового передатчика, что особенно важно для режима 32-APSK. В таких случаях необходимо использовать в режиме приема специальные профессиональные малощумящие конвертеры (LNC), стоимость которых выше, чем обычных бытовых.

При множестве несущих в ретрансляторе введение схемы предискажений не приносит положительного результата ни для одного из применяемых видов модуляции. В связи с этим приходится понижать выходную мощность передатчика и работать в квазилинейном режиме, в результате чего снижается реализуемое отношение сигнала к шуму.

Режимы, совместимые с обратным направлением, определены стандартом DVB-S2 в одном спутниковом канале связи для двух

информационных TS. Так, первый поток с высоким приоритетом (HP) совместим с применением как DVB-S, так и DVB-S2 приемников. Второй поток с низким приоритетом (LP) совместим только с DVB-S2 приемниками. Наличие двух потоков вызвано довольно длительным периодом совместного использования DVB-S и DVB-S2 ввиду большого количества уже используемых DVB-S приемников и постепенным переходом к одному DVB-S2 стандарту. Только в конце периода, когда в эксплуатации будут преобладать приемники стандарта DVB-S2, излучаемый со спутника сигнал может быть изменен к несовместимому с реверсным направлением режиму с использованием полного потенциала пропускной способности стандарта DVB-S2.

Иерархическая модуляция предусматривает использование двух параллельных каналов: DVB-S и DVB-S2. По второму каналу с LP увеличивается размерность сигнального созвездия до неравномерной 8-PSK (рис. 11.7). Из всех возможных конфигураций потока DVB-S2 разрешается только нормальная конфигурация FEC фрейма с 64800 битами (720 слотов \times 90 битов). Угол девиации θ (см. рис. 11.7) может изменяться по требованию пользователя: большие

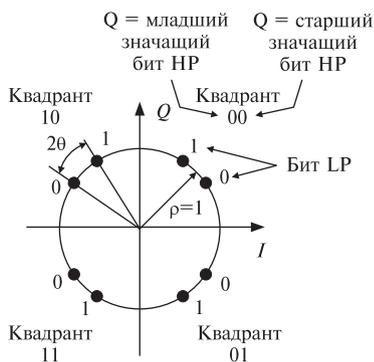


Рис. 11.7. Иерархическая модуляция

углы θ улучшают отношение сигнала к шуму C/N по отношению к каналу LP и понижают отношение C/N для канала HP.

Адаптивное кодирование и модуляция (ACM) является удачным техническим решением стандарта DVB-S2. Такой режим работы востребован для приложений класса «точка-точка» (например, IP вещание в один адрес или DSNG). Суть адаптации канала в режиме ACM сводится к тому, что в зависимости от изменения качества приема сигнала (например, из-за дождя) меняется режим работы модулятора DVB-S2 с изменением скорости кодирования (SR) и формата модуляции, что меняет в сторону улучшения отношение сигнала к шуму $(C/N)_{\text{треб}}$ на входе приемника абонента. Таким образом, режим ACM обеспечивает максимальную скорость цифрового потока в любых погодных условиях. Порог отношения C/N устанавливается на приемной стороне потребителем данной услуги (рис. 11.8) за счет непрерывного измерения отношения несущая/шум + помеха $(C/N + I)$ и посылки измеренного значения на вещательную наземную передающую станцию посредством реверсного канала. Параметр-

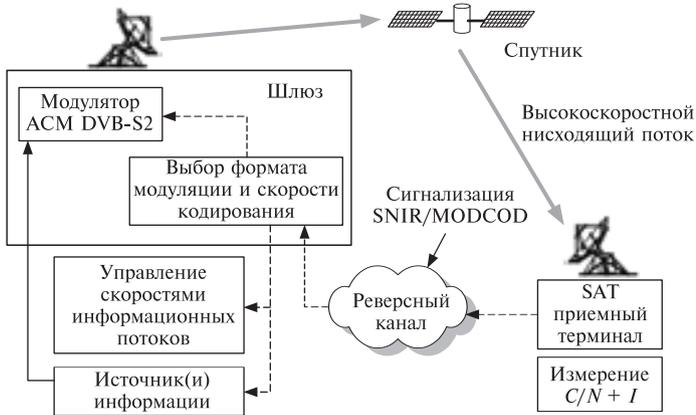


Рис. 11.8. Особенности схемы выбора на трассе формата модуляции и скорости кодирования

ры кодирования и модуляции могут изменяться от одного кадра к другому. Чтобы избежать переполнения принимаемой информации во время плохих условий приема (понижении SR), предусматривается возможность управления скоростями информационных потоков путем автоматической адаптации полезного трафика к физическим возможностям канала.

Критической проблемой в системах АСМ является временная задержка в петле адаптации физического уровня, поскольку это непосредственно связано с системной возможностью ограничений при отслеживании изменений состояния канала. Так, значительные задержки во времени могут приводить к потере некоторых кадров при резком ухудшении прохождения сигнала (из-за ухудшения погодных условий со скоростью изменения затухания на трассе более 1 дБ в секунду) или к потере потенциальной пропускной способности канала. Сознательное же увеличение защитного порога срабатывания системы АСМ (по аналогии с АРУ) может привести к ее экономической нецелесообразности.

Механизм функционирования системы АСМ сложен, особенно на уровне подсистемы для поддержки АСМ совместно с MPEG-TS (например, при мультиплексировании аудио, видео, мультимедиа и IP потоков). Однако, несмотря на сложность системы АСМ и ее зависимости от параметров линии связи и конфигурации, она позволяет увеличить пропускную способность до 200 % в сравнении с ССМ постоянством параметров кодирования и модуляции.

Вопросы к главе 11

1. Какие службы спутниковой связи используют в своей работе спутниковое телевидение?
2. Какие системы цифровой передачи многопользовательского телевидения Вам известны?
3. Назовите основные составные части устройства для приема спутникового телевидения.
4. Перечислите основные возможные способы приема сигналов спутникового телевидения.
5. Назовите основные модули цифрового приемника для приема спутникового телевидения.
6. Какие частотные диапазоны используются для спутникового телевидения?
7. Какой диапазон входных частот имеет цифровой приемник для спутникового телевидения?
8. В каких стандартах передается ретранслятором сигнал спутникового телевидения?
9. Какие основные узлы входят в МШУ-преобразователь?
10. Назовите основные особенности и характеристики стандарта для передачи спутникового телевидения DVB S2.

12 Энергетические соотношения на линии ССС с применением ГСО

12.1. Особенности энергетики спутниковых линий

Линии спутниковой связи без ретрансляции через вспомогательный спутник состоят из двух участков: Земля – спутник и спутник – Земля. В энергетическом смысле оба участка оказываются напряженными, первый — из-за стремления к уменьшению мощности передатчиков и упрощению земных станций (в особенности в системах с большим числом малых приемопередающих земных станций, работающих в необслуживаемом режиме), второй — из-за ограничений на массу, габаритные размеры и энергопотребление бортового ретранслятора.

Особенностью спутниковых линий связи является наличие больших потерь сигнала, обусловленных затуханием его энергии на трассах большой физической протяженности. Так, при высоте орбиты ИСЗ 36 тыс. км затухание сигнала на трассе может достигать 200 дБ, что соответствует ослаблению сигнала в 10^{20} раз. Помимо этого основного пространственного затухания сигнал на линиях спутниковой связи подвержен влиянию большого числа других факторов, таких, как поглощение в атмосфере, вращение плоскости поляризации, вызванное эффектом Фарадея, рефракция, деполяризация. На приемное устройство спутника и земной станции, кроме собственных аппаратных шумов, воздействуют разного рода помехи в виде теплового излучения земной поверхности, атмосферы, излучений Космоса, Солнца и планет. В этих условиях правильный и точный учет влияния всех факторов позволяет осуществить оптимальное проектирование системы, обеспечить ее надежную работу и в то же время исключить излишние энергетические запасы, приводящие к неоправданному увеличению сложности земной и бортовой аппаратуры. Точный учет воздействия на приемную антенну ЗС тепловых шумов окружающего пространства является сложной научной проблемой, которая рассмотрена в других работах.

Нормы на некоторые показатели качества спутниковых каналов (в том числе на отношение сигнал-шум) имеют статистический харак-

тер. Это заставляет приводить количественную оценку возмущающих факторов также статистическими методами и вводить при расчетах не только количественную меру воздействия соответствующего фактора, но и вероятность его появления.

Учитывается характер и число передаваемых сигналов, а также особенности их преобразования в спутниковом ретрансляторе. Необходимо иметь в виду, что при передаче программ телевидения бортовой ретранслятор работает в односигнальном режиме, типичном для наземных радиорелейных линий, и лишь усиливает ретранслируемый сигнал. При передаче телефонных каналов в системах с многостанционным доступом через бортовой ретранслятор проходит одновременно несколько сигналов, разделенных по частоте, времени или форме, оказывающих взаимное влияние, которое также должно учитываться при расчете энергетики спутниковых линий. В зависимости от класса системы на борту может применяться тот или иной вид обработки сигнала, в том числе и его полная регенерация, уменьшающая накопление шумов и искажений, возникающих на различных участках трассы.

12.2. Уравнения связи для спутниковых линий

С учетом структурной схемы одного из участков спутниковой линии связи эквивалентная изотропная излучаемая мощность (ЭИИМ) передающей станции определяется соотношением

$$E = P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} G_{\text{пер}},$$

где $P_{\text{пер}}$ — эффективная мощность на выходе передатчика; $\eta_{\text{пер}}$ — коэффициент передачи (по мощности) волноводного тракта (КПД тракта); $G_{\text{пер}}$ — коэффициент усиления передающей антенны относительно изотропного излучателя.

Затухание энергии сигнала в свободном пространстве, определяемое уменьшением плотности потока мощности при удалении от излучателя на расстояние d , определяется выражением

$$L_0 = 16\pi^2 d^2 / \lambda^2,$$

где λ — длина рабочей волны передатчика; d — наклонная дальность (расстояние между передающей и приемной антеннами).

В точке приема установлена антенна с коэффициентом усиления $G_{\text{пр}}$, связанная с приемником волноводным трактом с коэффициентом передачи $\eta_{\text{пр}}$. При согласовании волновых сопротивлений антенны, элементов тракта и приемника мощность сигнала на входе приемника

$$P_{\text{пр}} = \frac{E_3}{L_0 L_{\text{дон}}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} \lambda^2 G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}}}{16\pi^2 d^2 L_{\text{дон}}}.$$

Это выражение пригодно для расчета любых радиолиний прямой видимости, в том числе и спутниковых. Параметры антенны могут быть заданы также в виде эффективной площади ее апертуры $S_{\text{пр}}$, связанной с коэффициентом усиления соотношением вида $G_{\text{пр}} = 4\pi S_{\text{пр}}/\lambda^2$ [8], при этом предыдущее выражение может быть представлено в виде

$$P_{\text{пер}} = \frac{P_{\text{пр}} 4\pi d^2 L_{\text{доп}}}{G_{\text{пер}} S_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}}}. \quad (12.1)$$

Это соотношение определяет требуемую мощность передатчика при заданной мощности сигнала на входе приемника, при этом (12.1) не зависит от длины волны λ . Следовательно, если передающая антенна имеет постоянный коэффициент усиления на всех частотах, а приемная — постоянную эффективную площадь апертуры, мощность сигнала на входе приемника в первом приближении не зависит от частоты. В действительности некоторая зависимость от частоты имеется, так как затухание в волноводе и дополнительные потери $L_{\text{доп}}$ в какой-то степени зависят от диапазона частот.

При расчете линии часто оказывается заданной не мощность сигнала на входе приемника, а отношение сигнал-шум $(P_{\text{ш}}/P_{\text{с}})_{\text{вх}}$, тогда в (12.1) следует подставлять $P_{\text{пр}} = P_{\text{ш}}(P_{\text{ш}}/P_{\text{с}})_{\text{вх}}$, где $P_{\text{ш}}$ — полная мощность шума на входе приемника.

Поскольку в диапазонах СВЧ, на которых работают спутниковые системы, шумы различных источников имеют аддитивный характер, их суммарная мощность достаточно полно выражается формулой

$$P_{\text{ш}} = kT_{\Sigma}\Delta f_{\text{ш}}, \quad (12.2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц·град — постоянная Больцмана; T_{Σ} — эквивалентная шумовая температура всей приемной системы с учетом внутренних и внешних шумов, включая шумы антенны и фидера; $\Delta f_{\text{ш}}$ — эквивалентная шумовая полоса пропускания приемника.

В некоторых случаях при расчете энергетики спутниковых линий необходимо знать также напряженность электромагнитного поля, создаваемого излучением ИСЗ у поверхности Земли A_0 , или плотность потока мощности излучения ИСЗ на поверхности Земли W [37]:

$$A_0 = \frac{\sqrt{30P}}{d\sqrt{L_{\text{доп}}}}; \quad W = \frac{P}{4\pi d^2 L_{\text{доп}}} = \frac{A_0^2}{r_0 L_{\text{доп}}},$$

где $r_0 = 120\pi$ — волновое сопротивление свободного пространства; единицей величины A_0 является милливольт на метр (мВ/м), единицей величины W — ватт на квадратный метр (Вт/м²).

В свою очередь, мощность сигнала ИСЗ, воспринимаемая приемной антенной ЗС с эффективной площадью апертуры $S_{\text{пр}}$, может быть определена через плотность потока и напряженность поля следующим образом:

$$P_{\text{пр}} = WS_{\text{пр}} = A_0^2 S_{\text{пр}} / r_0 L_{\text{дон}}.$$

Приведенные соотношения устанавливают связь между основными параметрами линии связи и являются исходными соотношениями для вывода уравнений, определяющих энергетические параметры спутниковых линий. При этом на линии связи выполняются соотношения:

Для участка Земля – спутник

$$P_{\text{пер.з}} = \frac{16\pi^2 d_1^2 L_{1\text{дон}} P_{\text{шб}}}{\lambda_1^2 G_{\text{перз}} G_{\text{пр.б}} \eta_{\text{пер.з}} \eta_{\text{пр.б}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.б}}.$$

где $P_{\text{ш.б}} = kT_{\Sigma 6} \Delta f_{\text{ш.б}}$.

Здесь и далее всем показателям, относящимся к земной аппаратуре, присваивается индекс «з», а показателям, относящимся к бортовой аппаратуре, — индекс «б»: величины, относящиеся к участку Земля – спутник, имеют индекс «1», относящиеся к участку спутник – Земля — индекс «2».

Для участка трассы спутник – Земля

$$P_{\text{пер.б}} = \frac{16\pi^2 d_2^2 L_{2\text{дон}} P_{\text{ш.з}}}{\lambda_2^2 G_{\text{пер.б}} G_{\text{пр.з}} \eta_{\text{пер.б}} \eta_{\text{пр.з}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.з}},$$

где $P_{\text{ш.з}} = kT_{\Sigma 3} \Delta f_{\text{ш.з}}$.

Связь между отношениями сигнал-шум на выходе линии и на каждом из участков, в отсутствие обработки сигнала на борту с учетом сложения шумов на каждом участке определяется *суммарным отношением шум-сигнал на конце линии связи*

$$(P_{\text{ш}}/P_c)_{\Sigma} = (P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.б}} + (P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.з}}, \quad (12.3)$$

где $(P_{\text{ш}}/P_c)_{\Sigma}$ — отношение шума к сигналу на конце линии; $(P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.б}}$ — отношение шума к сигналу на входе приемника ИСЗ; $(P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.з}}$ — отношение сигнала к шуму на входе приемника ЗС.

Эти соотношения будут использованы далее при расчете энергетических параметров спутниковых линий связи.

Отношение сигнал-шум на каждом из участков должно быть выше, чем на конце линии:

$$(P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.б}} = a(P_{\text{ш}}/P_c)_{\Sigma}; \quad (P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.з}} = b(P_{\text{ш}}/P_c)_{\Sigma}, \quad (12.4)$$

где $a > 1$, $b > 1$.

Из (12.3) и (12.4) следует, что

$$a = b/(b - 1); \quad b = a/(a - 1). \quad (12.5)$$

Выражения (12.5) позволяют распределить заданное отношение $(P_{\text{ш}}/P_c)_{\Sigma}$ по соответствующим участкам линии связи. Если задаться превышением отношения сигнал-шум на участке спутник-Земля, равным 1 дБ ($b = 1,26$), то можно определить необходимое превышение этого отношения на участке Земля — спутник, которое должно составлять 7 дБ ($a \approx 5$). Распределение коэффициентов запаса a и b предполагает, что шумовые полосы бортового ретранслятора и земного приемника одинаковы. При условии $\Delta f_{\text{ш.з}} < \Delta f_{\text{б.р}}$ мощность шума на входе бортового приемника вычисляется в полосе $\Delta f_{\text{ш.з}}$.

С учетом изложенного уравнения для линии спутниковой связи, состоящей из двух участков, имеют вид:

для участка Земля — спутник

$$P_{\text{пер.з}} = \frac{16\pi^2 d_1^2 L_{1\text{доп}} k T_{\Sigma\text{б}} \Delta f_{\text{ш.б}}}{\lambda_1^2 G_{\text{пер.з}} G_{\text{пр.б}} \eta_{\text{пер.з}} \eta_{\text{пр.б}}} a \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma};$$

для участка спутник — Земля

$$P_{\text{пр.б}} = \frac{16\pi^2 d_2^2 L_{2\text{доп}} k T_{\Sigma\text{з}} \Delta f_{\text{ш.з}}}{\lambda_2^2 G_{\text{пер.б}} G_{\text{пр.з}} \eta_{\text{пер.б}} \eta_{\text{пр.з}}} a \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}.$$

12.3. Поглощение энергии сигнала в атмосфере

При расчете потерь на трассе необходимо учесть, как показано выше, дополнительные потери энергии сигнала в атмосфере и аппаратуре системы связи.

В диапазонах частот, выделенных для спутниковой связи, влияние воздушной атмосферы проявляется в виде поглощения радиоволн в тропосфере и ионосфере, искривления траектории радиолуча в результате рефракции и изменения вида и поворота плоскости поляризации радиоволн [1].

В диапазонах частот выше 500 МГц основное поглощение определяется тропосферными кислородом и парами воды, а также дождем и прочими гидрометеорами.

Величину поглощения в газах, дБ, можно представить в виде следующей суммы:

$$A_{\Gamma} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} l_{\text{H}_2\text{O}} + \gamma_{\text{O}_2} l_{\text{O}_2}, \quad (12.6)$$

где $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ и γ_{O_2} — погонное ослабление для водяного пара и кислорода соответственно, дБ/км; $l_{\text{H}_2\text{O}}$ и l_{O_2} — эффективные длины трасс в атмосфере, содержащей водяные пары и кислород, км. Значения

Таблица 12.1

Частота, ГГц	11	14	17,7	21,2	27,5	31,0
$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$, дБкм	0,0099	0,023	0,066	0,2	0,16	0,11
γ_{O_2} , дБкм	0,0123	0,0142	0,0165	0,02	0,026	0,032

величин погонных ослаблений в воде и кислороде на частотах выше 10 ГГц приведены в табл. 12.1.

При вертикальном прохождении радиоволн через тропосферу $l_{\text{H}_2\text{O}} = 2$ км, $l_{\text{O}_2} = 4$ км. Значения эффективных длин трасс в зависимости от угла места антенны можно определить по формулам

$$l_{\text{H}_2\text{O}}(\beta) = \sqrt{R_3^2 \sin^2 \beta + 2R_3 l_{\text{H}_2\text{O}} - R_3 \sin \beta}; \quad (12.7)$$

$$l_{\text{O}_2}(\beta) = \sqrt{R_3^2 \sin^2 \beta + 2R_3 l_{\text{O}_2} - R_3 \sin \beta},$$

где $R_3 = 8500$ км — эквивалентный радиус Земли

Для количественной оценки используются соотношения (12.6) и (12.7). Вычисления по этим соотношениям определяют постоянную составляющую потерь, а затухания сигнала в гидрометеорах рассчитывается в соответствии с формулой

$$L_{\text{д}} = L'_{\text{д}} l_3$$

и зависит от вида гидрометеоров (дождь, снег, туман), интенсивности осадков, размеров зоны действия и распределение интенсивности в зоне, а также от размеров и формы частиц гидрометеоров.

Эти факторы влияют на коэффициент погонного поглощения $L'_{\text{д}}$ и на эквивалентную длину пути сигнала l_3 . Больше ослабление вносят жидкие гидрометеоры в виде дождя, тумана, мокрого снега, а ослабление в твердых фракциях (град, сухой снег) значительно меньше.

Эквивалентная длина пути сигнала в дождевой зоне

$$l_3 \approx F(\varepsilon)[h'_{\text{д}} - h_3] / \sin \alpha,$$

где коэффициент $F(\varepsilon)$ учитывает неравномерность пространственного распределения интенсивности дождя; $h'_{\text{д}}$ — эквивалентная высота дождевой зоны.

Для расчета величины поглощения при дождях разной интенсивности необходимо учитывать распределение вероятности выпадения осадков. Эта задача плохо поддается теоретическому решению и поэтому базируется на экспериментальных данных метеорологии. Метеорологические данные обычно дают распределения, усредненные за

Таблица 12.2

Время, %	12	1,4	0,3	0,06
Скорость изменения, дБ/с	0,1	0,2	0,3	0,4

год или за месяц, тогда как при расчетах энергетических параметров требуется знание среднечасовых, средних по минутам и даже по секундам распределений интенсивности осадков.

Функция распределения уровня сигнала из-за затухания в дожде определяется распределением интенсивности осадков и функциональной зависимостью коэффициентов погонного поглощения от интенсивности осадков.

Обработка статистических данных показывает, что средние за минуту распределения интенсивности дождя хорошо описываются логарифмически нормальным законом

$$u(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon \sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\log \varepsilon - \log m)^2}{2\sigma_\varepsilon^2} \right],$$

где σ_ε^2 и m — дисперсия и среднее значение.

Необходимо иметь представление о динамике затухания радиоволн в дождевых осадках, базирующейся на статистике скорости и длительности этих затуханий, что важно при проектировании цифровых спутниковых радиолиний с адаптивными методами передачи. Приведенные в табл. 12.2 сведения базируются на экспериментальных данных, полученных на отечественных и зарубежных спутниковых радиолиниях.

Из приведенных данных следует, что скорость изменения затухания на частоте 12 ГГц для радиоволн с круговой поляризацией практически не зависит от угла места и увеличивается в первом приближении пропорционально частоте.

Из статистики длительностей затуханий следует, что с вероятностью 50 % продолжительность затухания глубиной 5 дБ составляет 2...3 с, а продолжительность интервала между затуханиями той же глубины в пределах одного дождя достигает 20...30 с.

Затухание в дожде может быть весьма значительным (особенно в диапазонах частот выше 10 ГГц) и может существенно влиять на энергетику спутниковых радиолиний. Одной из мер борьбы может быть применение пространственно-разнесенного приема, при котором две земные станции удаленные одна от другой на интервал в несколько километров, принимают одни и те же сигналы от ИСЗ с последующим их сложением. Вероятность одновременного выпадения дождя в

местах расположения обеих станций (совместная вероятность $T_{д\Sigma}$) меньше вероятности выпадения дождя той же интенсивности на одной из станций $T_{д}$.

Из экспериментально полученных зависимостей $T_{д\Sigma}$ от $T_{д}$ следует, что пространственный разнос приемных станций на 10...20 км уменьшает совместную вероятность выпадения дождя практически в 10 раз. Энергетический выигрыш при этом показывает, что пространственный разнос приемных станций является эффективным средством борьбы с ослаблением в осадках и может дать при этом энергетический выигрыш более 10 дБ.

Еще одной причиной затухания сигнала является поглощение радиоволн в облаках. Эти ослабления даже в мощных конвекционных облаках существенно меньше, чем в дождевых осадках, но вероятность их появления и длительность значительно больше.

В диапазонах частот 10...30 ГГц наличие облаков может приводить к продолжительным ($T_{обл} \approx 5...10\%$) ослаблениям сигналов на 0,5...1 дБ, а в малых процентах времени ($T_{обл} \approx 0,1\%$) оно может достигать 4...5 дБ и даже 7 дБ при углах места $\beta = 10^\circ$.

Заметным свойством поглощения энергии радиоволн обладает туман, интенсивность которого измеряется дальностью предельной оптической видимости S , а поглощающая способность L'_T (дБ/км) определяется абсолютной влажностью ρ (г/м³). Связь этих параметров может быть представлена в виде эмпирических формул: $\rho \approx 3S^{-4,3}$, $L_T = 0,483\rho/\lambda^2$.

Средняя вертикальная протяженность тумана обычно не превышает 0,5...0,6 км, зато горизонтальная протяженность может достигать 100 км, а продолжительность существования этой фракции может быть значительно большей, чем дождевой.

Из интегрального распределения потерь из-за тумана на частоте 4 ГГц для климатических зон Европы следует, что в течение 99,9 % времени затухание сигнала при $\alpha = 5^\circ$ не превышает 1 дБ.

В ряде климатических районов на уровень сигналов влияют снег (особенно мокрый) и град. Коэффициенты погонного затухания в сухом снеге и граде $L'_{e.c}$ значительно меньше, чем при дожде той же интенсивности. Количественные соотношения $L'_{c.c}$ и L'_d при интенсивности осадков 100 мм/ч для различных диапазонов частот приведены в табл. 12.3. Поглощение в мокром снеге примерно такое, как в дожде равной интенсивности, однако в отдельных случаях при выпадении особенно крупных хлопьев мокрого снега может оказаться в 4...6 раз большим, чем для дождя, однако это явление достаточно редкое и

Таблица 12.3

f , ГГц	8	11	18	25	35
$L'_{с.с.}$, дБ/км	0,0067	0,0107	0,0312	0,0362	0,281
L'_{Δ} , дБ/км	0,085	0,24	0,78	1,5	2,6

при расчетах для наилучшего месяца года достаточно учитывать поглощение в дожде.

Ионосфера тоже оказывает влияние на прохождение радиоволн, но поглощение при этом на частотах выше 1 ГГц мало: $L_{и} \approx 2,5 \times 10^{15}/f^2$ и не превышает $2,5 \cdot 10^{-3}$ дБ даже при низких углах места антенны.

12.4. Влияние рефракции и неточности наведения антенн

Рефракция — это искривление траектории сигнала при прохождении через атмосферу (ионосферу и тропосферу). *Ионосферную рефракцию* (в градусах), или угол отклонения от прямолинейного распространения для стандартной атмосферы можно определить по формуле

$$\delta_{и} = -57,3 \cos \alpha / f^2 \sin^2 \alpha,$$

из которой следует, что она обратно пропорциональна квадрату частоты и становится пренебрежимо малой при $f > 5$ ГГц. *Тропосферная рефракция* не зависит от частоты. Для стандартной атмосферы при малых углах места регулярная составляющая тропосферной рефракции (в градусах) $\delta_{тр} \approx (n - 1) \operatorname{ctg} \alpha$.

При наличии автосопровождения и автоматическом наведении антенн по максимуму приходящего сигнала влияние рефракции практически исключается. Необходимо учитывать еще один вид потерь, вызванных неточностью наведения антенн земных станций на ИСЗ. Величина этих потерь определяется угловым отклонением оси главного лепестка диаграммы направленности от истинного направления на ИСЗ, а также шириной и формой этого лепестка. Обычно пользуются одной из представленных ниже аппроксимаций формы диаграммы в пределах центральной части главного лепестка:

$$\frac{G(\theta)}{G(0)} \approx \frac{\sin(2\theta/\theta_{0,5})}{2\theta/\theta_{0,5}} \approx \frac{1}{1 + (2\theta/\theta_{0,5})^2},$$

где $\theta_{0,5}$ — ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности. Потери наведения в этом случае определяются соотношением

$$L_{н} = G(0)/G(\theta) \approx 1 + (2\theta/\theta_{0,5})^2. \quad (12.8)$$

В современных системах наведения управление антенной обычно ведется по двум ортогональным осям (например, по азимуту и углу места). При этом угловую погрешность наведения по каждой из осей можно представить суммой трех компонент:

$$\varphi_{A\beta} = \varphi_M + \varphi_{\text{фл}} + \varphi_v,$$

где φ_M — угловая ошибка, вызванная несовершенством механической части системы наведения (люфтов шестерен и деформаций зеркала); $\varphi_{\text{фл}}$ — флюктуационная ошибка из-за шумов в каналах слежения; φ_v — динамическая (скоростная) ошибка, обусловленная инерцией движения антенны при наведении.

Первая из компонент обычно задается в паспортных данных на конструкцию антенны; вторая вычисляется по ожидаемому отношению сигнал-шум в каналах приема и имеет распределение Гаусса с параметрами $\sigma_{\text{фл}}$, $m_{\text{фл}}$; третья же зависит от скорости углового перемещения ИСЗ ω относительно наземного пункта, где расположена антенна, и может быть определена из уравнения

$$\varpi(t) = k_c |v(t)r|/d(t),$$

где k_c — коэффициент передачи канала слежения; v — скорость спутника в пространстве; r — радиус-вектор; d — расстояние до спутника (наклонная дальность).

Это уравнение решается при расчете указаний цели для земных станций системы. Для определения $\varphi_v(t)$ проводится статистическая обработка целеуказаний для нескольких земных станций системы. Результаты обработки применительно к спутникам типа «Молния-3» и «Экран» показывают, что максимальные скорости перемещения ИСЗ типа «Молния» не превышают 0,2 град/с, а для геостационарных ИСЗ они существенно меньше. Поскольку распределение $F(\omega)$ близко к гауссовскому, соответственно плотность вероятности угловой ошибки наведения в каждой из плоскостей

$$\varpi(\varphi_{A\beta}) = \frac{1}{(\sigma_{\text{фл}} + \sigma_v)\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\varphi + \varphi_M - m_{\text{фл}} - m_v)^2}{2(\sigma_{\text{фл}} + \sigma_v)^2} \right]. \quad (12.9)$$

Соотношения (12.8) и (12.9) позволяют рассчитать значение и плотность вероятности ошибки наведения по каждой из осей, суммарная же ошибка наведения в картинной (наклонной) плоскости определяется как

$$\varphi_\Sigma = \sqrt{\varphi_A^2 + \varphi_\beta^2},$$

а плотность вероятности ошибок наведения подчиняется обобщенному

закону Релея

$$\varpi(\varphi_{\Sigma}) = \frac{\varphi_{\Sigma}}{\sigma_{\varphi_{\Sigma}}^2} \exp \left[-\frac{\varphi_{\Sigma}^2}{2\sigma_{\varphi_{\Sigma}}^2} \right].$$

12.5. Фазовые эффекты в атмосфере

С влиянием атмосферы связаны эффект Фарадея и вытекающее из него следствие — *фазовая дисперсия сигналов*. Как известно, эффект Фарадея обусловлен тем, что при распространении линейно поляризованной волны вдоль меридиана под действием магнитного поля Земли эта волна расщепляется на две составляющие, которые распространяются в ионосфере с различными фазовыми скоростями. В связи с этим между составляющими появляется фазовый сдвиг, который приводит к повороту плоскости поляризации результирующей волны.

При некоторых упрощающих предположениях угол поворота плоскости поляризации определяются как

$$\psi \approx 2,32 \cdot 10^{19} / f^2 \sqrt{1 - 0,91 \cos \alpha}.$$

Результаты расчетов по этой формуле для нескольких значений частоты и углов наклона антенны к горизонту приведены в табл. 12.4. Из этой таблицы следует, что эффект Фарадея приводит к заметному изменению наклона вектора напряженности электрического поля, определяющего поляризацию, на частотах ниже 5 ГГц; на частотах выше 10 ГГц с этим явлением можно не считаться.

Влияние эффекта Фарадея сказывается в том, что при связи на линейной поляризации возникают потери сигнала между коллинеарными антеннами, определяемые выражением $L_{\Phi} = 20 \lg(\cos \psi)$.

С учетом этого на частотах ниже 10 ГГц в спутниковых системах используется исключительно круговая поляризация; в более высокочастотных диапазонах фазовые эффекты малы и не препятствуют применению линейной поляризации.

Фазовые эффекты в атмосфере, точнее их частотная зависимость, приводят к фазовой дисперсии частотных компонент передаваемых сигналов и искажениям при приеме. Подобно эффекту Фарадея, степень влияния этих эффектов обратно пропорциональна квадрату

Таблица 12.4

f , ГГц	0,1	0,5	1	2	5	10
ψ , град: при $\beta = 90^\circ$	2400	95	25	6	1	0,3
при $\beta = 0$	6000	250	60	18	3	1

Таблица 12.5

f , ГГц	0,5	1	5	10
Δf , МГц	10	25	270	750

частоты. Полный сдвиг фазы сигнала $\psi_0 = (2\pi f/c) \int n dl$, где n — показатель преломления атмосферы, c — скорость света; $\tau = d\psi_0/dt$ — групповое время запаздывания сигнала.

Для устранения искажений разность группового времени запаздывания $\Delta\tau$ для крайних частот широкополосного сигнала полосой Δf должно удовлетворять соотношению $\Delta\tau\Delta f \ll 1$. Тогда при $\Delta\tau\Delta f = 0,1$ полоса пропускания соответствует соотношению $\Delta f \leq \sqrt{3 \cdot 10^{-11} f^3}$. Результаты расчетов по этой формуле приведены в табл. 12.5, из которой следует, что наибольшая полоса сигнала, передаваемая через атмосферу без фазовых искажений, составляет примерно 25 МГц в диапазоне 1 ГГц и увеличивается до 270 МГц в диапазоне 4...6 ГГц.

Указанные ограничения по полосе пропускания учитываются при проектировании широкополосных ТВ и ТЛФ линий в диапазонах частот ниже 4 ГГц.

12.6. Потери из-за несогласованности поляризаций антенн

Нормированный коэффициент передачи энергии между двумя антеннами в общем случае (когда обе антенны имеют эллиптическую поляризацию) имеет вид

$$K = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4e_1e_2}{(1+e_1^2)(1+e_2^2)} + \frac{(1-e_1^2)(1-e_2^2)}{(1+e_1^2)(1+e_2^2)} \cos 2\psi \right], \quad (12.10)$$

где e_1 и e_2 — коэффициенты эллиптичности (отношение малой полуоси эллипса к большой) поляризации передающей и приемной антенн соответственно; ψ — угол между соответствующими полуосями эллипсов поляризации передающей и приемной антенн.

С учетом (12.10) и относительных положений и параметров эллипсов поляризации антенн можно определить потери мощности сигнала L_{Π} для данной приемной антенны по сравнению с антенной, эллипс поляризации которой совпадает с эллипсом поляризации передающей антенны.

В табл. 12.6 приведены значения коэффициентов передачи для различных видов поляризаций передающей и приемной антенн.

Как следует из табл. 12.6, при линейной поляризации обеих антенн коэффициент передачи получается максимальным тогда, когда оба вектора поляризации параллельны. При связи через космические

Таблица 12.6

Поляризация приемной антенны	Коэффициент передачи и поляризация передающей антенны		
	линейной	круговой правой	круговой левой
Линейная	$(1 + \cos 2\psi)/2$	1/2	1/2
Круговая правая	1/2	1	0
Круговая левая	1/2	0	1

объекты это условие нарушается из-за изменения взаимного расположения объекта и земной станции и в связи с влиянием фазовых эффектов в атмосфере. Поэтому в диапазонах частот 1...5 ГГц предпочтительной считается круговая поляризация; а в диапазонах выше 10 ГГц при выборе вида поляризации учитываются эффекты деполяризации сигналов в атмосфере, которые будут рассмотрены ниже.

Статистическая оценка поляризационных потерь не представляется возможной, поэтому при расчетах энергетики спутниковых линий следует принимать их существующими постоянно.

12.7. Деполяризация радиоволн в атмосфере

В связи с освоением диапазонов частот выше 10 ГГц и применением в спутниковых системах поляризационного разделения сигналов представляет практический интерес исследование еще одного эффекта, связанного с прохождением радиоволн через атмосферу — эффекта деполяризации в гидрометеорах.

При рассмотрении эффекта поглощения сигнала в гидрометеорах не делалось никаких оговорок относительно формы частиц гидрометеоров, точнее, подразумевалось, что они имеют сферический вид. Такая модель гидрометеоров не вызывает деполяризации распространяющегося через осадки СВЧ сигнала. В действительности же капли дождя (основного фактора поглощения) при наклонном падении имеют несимметричную форму относительно вертикальной оси, что приводит различию затуханий и фазовых сдвигов для вертикальной и горизонтальной составляющих поляризации. Это является причиной деполяризации и возникновения ортогональной поляризационной компоненты, называемой кроссполяризацией. Так, при общем затухании 30...40 дБ различие в затуханиях волн с горизонтальной и вертикальной поляризациями (так называемое дифференциальное затухание) $L_{\text{диф}} = L_{\text{гор}} - L_{\text{верт}}$ может достигать 6...8 дБ на частотах 20...30 ГГц.

Относительная величина паразитной составляющей поляризации оценивается коэффициентом развязки кроссполяризационных сигналов (РКП), представляющим собой отношение мощностей ортогона-

льной и основной поляризацій. Зависимость РКП от затухания в дожде показывает, что при $L_d \geq 20...30$ дБ значение кроссполяризационной компоненты может достигать 15...10 дБ и представлять ощутимую помеху для приема.

Для волн с линейными поляризациями важное значение имеет наклонное падение, когда фактический наклон капель дождя не всегда соответствует наклону ливня, а также то, что в общем ливне существуют капли с положительным и отрицательным наклоном при общем балансе, соответствующем наклону ливня. Из-за этих факторов линейно поляризованные радиоволны также будут испытывать деполяризацию, особенно когда наклон вектора поляризации отличен от угла наклона ливня. Максимальная деполяризация, очевидно, будет при относительном наклоне вектора поляризации на 45° , и уровень кроссполяризации будет при этом примерно таким же, как и для круговой поляризации.

Приведенные данные позволяют сделать выводы о том, что деполяризация сигнала на частотах выше 5 ГГц связана с поглощением радиоволн в гидрометеорах, и, следовательно, количественная оценка этого явления должна коррелироваться со статистикой дождя.

Для средних климатических условий СНГ, где интенсивность дождя невелика, деполяризация будет приводить к появлению реальных помех ($PKP \leq 25$ дБ): для систем ТВ вещания $\varepsilon(1\%) \leq 5$ мм/ч на частотах выше 18 ГГц; для систем ТЛФ связи $\varepsilon(0,01\%) \leq 12,5$ мм/ч на частотах выше 12 ГГц.

Теоретически линейная поляризация предпочтительнее круговой, и, хотя практическая реализация этих преимуществ во всей зоне обслуживания ИСЗ не всегда возможна, подавляющая часть спутниковых систем в диапазонах частот выше 10 ГГц работает с линейной поляризацией.

12.8. Шумы атмосферы, земной поверхности, планет и приемных систем

Поскольку мощность принимаемых сигналов мала, при расчете спутниковых радиолиний важно определить полную мощность шумов, создаваемых на входе приемного устройства спутника и земной станции от различных источников. Мощность шума на входе приемника может быть определена в соответствии с (12.2) при учете количественной оценки входящих в нее параметров.

Эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приемни-

Таблица 12.7

n	1	2	3	5	10
γ_1	1,57	1,22	1,15	1,11	1,09
γ_2	1,11	1,038	1,022	1,01	1,002

ка определяется как

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{1}{K^2(f_0)} \int_{-\infty}^{\infty} K^2(f) df,$$

где $K(f)$ — частотная характеристика ПЧ тракта приемника.

Эта полоса обычно несколько шире полосы частот тракта промежуточной частоты по уровню 0,7 от уровня максимального напряжения: $\Delta f_{0,7}$. Если представить, что полоса шумов определяется соотношением $\Delta f_{\text{ш}} = \gamma \Delta f_{0,7}$, то значения коэффициентов γ для n включенных последовательно одно- (γ_1) и двухконтурных (γ_2) каскадов УПЧ, определяются величинами, приведенными в табл. 12.7.

Полная эквивалентная шумовая температура приемной системы, состоящей из антенны, волноводного тракта и собственно приемника, пересчитанная на вход приемника,

$$T_{\Sigma} = T_a \eta_{\text{в}} + T_0(1 - \eta_{\text{в}}) + T_{\text{пр}}, \quad (12.11)$$

где T_a — эквивалентная шумовая температура антенны; T_0 — абсолютная температура среды (290 К); $T_{\text{пр}}$ — эквивалентная шумовая температура собственно приемника, обусловленная его внутренними шумами; $\eta_{\text{в}}$ — коэффициент передачи волноводного тракта.

Определение составляющих (12.11) с высокой точностью для вычисления мощности шума (12.2), входящей в уравнения связи, является сложной научно-технической задачей.

Эквивалентная шумовая температура антенны может быть представлена в виде составляющих:

$$T_a = T_{\text{к}} + T_a + T_3 + T_{\text{а.з}} + T_{\text{ш.а}} + T_{\text{об}}, \quad (12.12)$$

которые обусловлены различными факторами: приемом космического радиоизлучения ($T_{\text{к}}$); излучением атмосферы с учетом гидрометеоров (T_a); излучением земной поверхности, принимаемым через боковые лепестки антенны (T_3); приемом излучения атмосферы, отраженного от Земли ($T_{\text{а.з}}$); собственными шумами антенны из-за наличия потерь в ее элементах $T_{\text{ш.а}}$, влиянием обтекателя антенны $T_{\text{об}}$, если он имеется. Общая методика определения этих составляющих основана на том, что антенна, находящаяся в бесконечном объеме поглощающей

среды с однородной кинетической температурой, при термодинамическом равновесии поглощает и излучает мощность одной и той же величины. В этом случае

$$T_a = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} T_{\text{я}}(\varphi, \theta) G(\varphi, \theta) d\Omega,$$

где $T_{\text{я}}(\varphi, \theta)$ — яркостная температура излучения в направлении φ, θ в сферической системе координат; $G(\varphi, \theta)$ — коэффициент усиления антенны (относительно изотропного излучателя) в том же направлении.

Яркостная температура характеризует источники излучения и определяется как температура абсолютно черного тела, имеющего на данной частоте и в данном направлении такую же яркость, что и рассматриваемый источник.

Для характеристики источников излучения с неравномерным распределением яркостной температуры используется понятие усредненной, или эффективной (действующей) температуры излучения

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\Omega_{\text{и}}} \int_{\Omega_{\text{и}}} T_{\text{я}}(\varphi, \theta) d\Omega,$$

где $\Omega_{\text{и}}$ — телесный угол источника излучения.

Если угловые размеры источника излучения больше ширины главного лепестка диаграммы антенны $\Omega_{\text{а}}$, то $T_{\text{ср}} = T_{\text{я}}$, в противном случае

$$T_{\text{ср}} \approx T_{\text{я}} \Omega_{\text{и}} / \Omega_{\text{а}}. \quad (12.13)$$

В настоящее время широко используются упрощенные методы расчета шумовой температуры антенн, усиление антенны принимается постоянным и равным в пределах главного лепестка $G_{\text{гл}}$, а в пределах задних и боковых лепестков также постоянным и равным $G_{\text{бок}}$. Тогда

$$T_a = \frac{G_{\text{гл}}}{4\pi} \int_{\Omega_{\text{гл}}} T_{\text{я}}(\alpha, \theta) d\Omega + \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^n \int_{\Omega_{\text{бок } i}} G_{\text{бок } i} T_{\text{я}}(\alpha, \theta) d\Omega.$$

Далее это уравнение решается для всех составляющих шума (12.12) с учетом (12.13), после чего для земной антенны

$$T_{\text{а.з}} = T_{\text{я.к}}(\alpha) + T_{\text{я.а}}(\alpha) + c(T_{\text{я.з}} + T_{\text{я.а.з}}) + T_{\text{ш.а}} + T_{\text{об}}(\alpha); \quad (12.14)$$

для бортовой антенны

$$T_{\text{а.б}} = T_{\text{я.а}} + T_{\text{я.з}} + 2cT_{\text{я.к}} + T_{\text{ш.а}}, \quad (12.15)$$

где

$$c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{\Omega_{\text{бок } i}} G_{\text{бок } i}(\alpha, \theta) d\Omega \Big/ \int_{\Omega_{\text{гл}}} G(\alpha, \theta) d\Omega$$

— коэффициент, учитывающий интегральный уровень энергии боковых лепестков.

Как следует из (12.14), первая составляющая температуры шумов антенны определяется яркостной температурой космического пространства.

Из частотной характеристики усредненных по небесной сфере значений $T_{я.к}$ видно, что космическое излучение существенно на частотах ниже 4...6 ГГц; максимальное значение на данной частоте отличается от минимального в 20...30 раз, что обусловлено большой неравномерностью излучения различных участков неба; наибольшая яркость наблюдается в центре Галактики; имеется также ряд локальных максимумов.

Следует отметить, что излучение Галактики имеет сплошной спектр и слабо поляризовано; поэтому при приеме его на поляризованную антенну (с любым видом поляризации) можно с достаточной степенью точности считать, что принимается 1/2 всей мощности излучения, падающей в раскрыв антенны.

Самым мощным источником радиоизлучения является Солнце, которое может полностью нарушить сеанс связи, если попадает в главный лепесток диаграммы направленности антенны. Вероятность же этого мала и составляет, в первом приближении, величину

$$p = D^2 / (\pi - \beta^2) \approx 0,6 \cdot 10^{-4},$$

где $D \approx 1,4^\circ$ — размеры опасной области излучения Солнца (угловой размер Солнца составляет $0^\circ 32'$).

Для систем связи с ИСЗ на геостационарной орбите эта вероятность с учетом уровня боковых лепестков диаграммы антенны на порядок выше и составляет $(2...5) \cdot 10^{-4}$ в зависимости от долготы ИСЗ.

Для геостационарного ИСЗ максимальное время прохождения опасной зоны составляет

$$t_{\max} = (\theta_{0,5} + D) / (v_C \pm v_{сн}),$$

где $\theta_{0,5}$ — ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности; v_C и $v_{сн}$ — угловые скорости Солнца и спутника относительно земной станции соответственно. Знак «плюс» в этой формуле выбирается при перемещении спутника связи относительно солнечного диска в направлении востока, знак «минус» — запада.

Следует отметить, что проекция спутника довольно редко проходит через центр солнечного диска, она обычно пересекает его по линиям, смещенным относительно центра, соответственно и время прохождения опасной зоны оказывается меньше.

Точная дата и время «засветки» земных антенн солнечным диском обычно рассчитывают по данным орбиты ИСЗ и сообщают земным станциям вместе с координатами спутника.

Еще одним источником теплового радиоизлучения является Луна, но она обычно не нарушает связь, так как ее яркостная температура не превышает 220 К. Остальные источники, такие как планеты и радиозвезды, играют существенно меньшую роль. Вероятность наведения главного лепестка диаграммы направленности антенн на эти источники меньше, чем на Солнце, так как их угловые размеры малы.

Радиоизлучение земной атмосферы имеет тепловой характер и в полной мере обусловлено поглощением сигналов в атмосфере. В силу термодинамического равновесия атмосфера излучает такое же количество энергии на данной частоте, которое поглощает соответственно

$$T_{я.а} = T_{а.ср}(L_a - 1)/L_a.$$

Как показывают расчеты, средняя термодинамическая температура стандартной атмосферы для углов места $\beta \geq 5^\circ$ в рассматриваемых диапазонах частот и

$$T_{а.ср} \approx T_0 - 32 \approx 260 \text{ К}.$$

Раздельное вычисление температур спокойного неба и дождя с последующим их суммированием может привести к ошибке, поэтому вычисление яркостной температуры с учетом осадков проводится по формуле

$$T_{я.а} = T_{а.ср}(L_a L_d - 1)/L_a L_d.$$

Приведенная оценка температуры атмосферы, по существу, относится к тропосфере; радиоизлучением ионосферы в диапазоне частот выше 1 ГГц можно пренебречь, так как поглощение в ионосфере обратно пропорционально квадрату частоты.

Яркостная температура Земли определяется ее кинетической температурой $T_{03} = 290 \text{ К}$ и коэффициентом отражения электромагнитной энергии от поверхности Земли

$$T_{я.з} = T_{03}(1 - R_{в,г})^2. \quad (12.16)$$

Здесь $R_{в,г}$ — комплексный коэффициент отражения для вертикальной или горизонтальной поляризации, определяемый известными формулами Френеля.

Такие оценочные расчеты, включая учет влияния теплового излучения почвы, справедливы при зеркальном отражении, тогда как на

Таблица 12.8

f , ГГц	0,3	1	3	10	30	60
$T_{ш.а}$, К	0,018	0,04	0,06	0,09	0,18	0,3

высоких частотах, где размеры отражающих поверхностей соизмеримы с длиной волны, большой вес будет иметь диффузная компонента, определяемая кинетической температурой Земли и равная 290 К.

При определении величины $T_{я.З}$, входящей в (12.15) для бортовой антенны, следует учитывать вид и характер земной поверхности, включая и водную поверхность, попадающую в зону видимости этой антенны. Для бортовых антенн с глобальным охватом следует принимать $T_{я.З} \approx 260$ К; для антенн с узкими лучами $T_{я.З}$ может составлять 100...260 К.

Яркостная температура излучения атмосферы, отраженного от Земли,

$$T_{я.а.З} = T_{я.а} \Phi^2. \quad (12.17)$$

Так как на частотах выше 10 ГГц $T_{а.З} \approx T_{0З} = 290$ К, то из (12.16) и (12.17) принимается

$$T_{я.З} + T_{я.а.З} \approx 290,$$

т. е. отраженная от Земли компонента атмосферных шумов дополняет термодинамическое излучение Земли, и в сумме они дают излучение с яркостной температурой, близкой к 290 К. Далее эти компоненты будут рассматриваться более подробно.

Составляющая шумов антенны в (12.14) и (12.15), обусловленная омическими потерями в антенне,

$$3T_{ш.а} = T_0(L_M - 1)/L_M,$$

где $T_0 = 290$ К; L_M — потери в материале зеркала антенны.

Современные металлические зеркальные антенны имеют весьма низкие потери, поэтому значения $T_{ш.а}$ весьма малы и составляют на разных частотах значения, указанные в табл. 12.8.

Однако при использовании в спутниковых вещательных системах земных антенн из металлизированного стеклопластика удельный вес этих потерь может возрасти и потому подлежит практической оценке.

В некоторых случаях антенны земных станций укрывают от воздействия осадков радиопрозрачным обтекателем. Потери сигнала и соответствующий прирост шумов обычно невелики и могут практически не учитываться. Но во время интенсивных дождей на поверхности обтекателя образуется водяная пленка, которая является причиной

заметного поглощения сигнала и возникновения вторичных шумов. Как показывают эксперименты, при $\varepsilon = 1$ мм/ч прирост шумовой температуры составляет 4...8 К, а при $\varepsilon = 10$ мм/ч может достигать 12...20 К, причем нижние пределы соответствуют малым углам места антенны, а верхние — $\beta = 90^\circ$.

Описанный выше метод расчета дает лишь оценочные результаты при расчете шумовой температуры антенн земных станций. Шумовая температура МШУ, применяемых вместе с антенной, в настоящее время практически сравнялась, а во многих случаях меньше шумовой температуры антенн. Шумовые параметры МШУ могут быть достаточно просто измерены на образцах, в то время как единственным способом определения шумовых параметров крупногабаритных антенн земных станций является использование высокоэффективного метода фрагментации окружающего антенну пространства для расчета шумовой температуры с учетом диапазона рабочих частот, физического состояния окружающей среды, формы и наклона к горизонту диаграммы направленности.

12.9. Расчет шумов в каналах спутниковых радиолиний

Все ранее изложенное позволяет проводить расчеты параметров спутниковой радиолинии. Для этого необходимо задавать основные постоянные величины, входящие в уравнение связи: диапазоны частот, высота и тип орбиты ИСЗ, коэффициенты усиления земных и бортовых антенн, а также КПД волноводных трактов; должны быть заданы также вид, число и параметры передаваемых сигналов. Расчет состоит в определении переменных величин, входящих в уравнения связи (потерь энергии сигнала под влиянием перечисленных факторов и шумов различного происхождения), и вычислении отношения сигнал-шум на конце линии связи (при заданных значениях мощностей земного и бортового передатчиков) либо мощностей этих передатчиков по требуемым отношениям сигнал-шум.

При передаче по телефонным линиям связи можно рассчитать пропускную способность ВЧ ствола бортового ретранслятора применительно к выбранному методу многостанционного доступа и уточнить параметры земного приемопередающего оборудования.

При передаче телефонных сообщений цифровыми методами нормы на качественные показатели каналов задаются в виде вероятности ошибочного приема; при этом параметры аналого-цифрового преобразования, вид и форма кодирования определяются применяемой каналобразующей аппаратурой.

Чтобы установить количественную связь между вероятностью ошибки при передаче двоичных сигналов и отношением сигнал-шум на входе демодулятора, удобно воспользоваться следующим известным соотношением:

$$p_{\text{ош}} = 1 - \Phi \left[\sqrt{(E/N_0)(1 - R_k)} \right],$$

где E — энергия каждого из передаваемых двоичных сигналов (1 или 0); N_0 — спектральная плотность шума на входе демодулятора ($N_0 = kT_{\Sigma}$);

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-x^2/2) dx$$

— интеграл вероятности; R_k — коэффициент взаимной корреляции двоичных сигналов (символов 1 и 0).

Поскольку при двоичной передаче $E = P_c \tau$, где τ — длительность каждого из двоичных сигналов, а при оптимальном приеме эквивалентная полоса приемника принимается $\Delta f_{\text{ш}} \approx 1/\tau$, то $(E/N_0) \approx \approx (P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх}}$. В зависимости от применяемого метода модуляции коэффициент R_k принимает различные значения. Так, при амплитудной модуляции и оптимальном выборе порога решающего $R_k \approx 1/2$ и

$$p_{\text{ош}}(\text{АМ}) = 1 - \Phi(\sqrt{P_c/2P_{\text{ш}}}).$$

При частотной модуляции (при достаточно большом разnose частот посылок) $R_k \approx 0$ и

$$p_{\text{ош}}(\text{ЧМ}) = 1 - \Phi(\sqrt{P_{\text{ш}}/P_c}).$$

При двоичной фазовой модуляции $R_k = -1$ и вероятность ошибки оказывается минимальной:

$$p_{\text{ош}}(\text{ФМ}) = 1 - \Phi \left(\sqrt{2P_{\text{ш}}/P_c} \right).$$

Для достоверной передачи информации по дуплексной линии связи между первой ЗС, ИСЗ и второй ЗС суммарное отношение энергии информационного бита к спектральной плотности мощности теплового шума $(E_b/N_0)_{\Sigma}$ должно превышать пороговое отношение на входе последнего демодулятора. На такой линии связи отношение $(E_b/N_0)_{\Sigma 1}$ определяется следующим образом:

$$\frac{1}{(E_b/N_0)_{\Sigma 1}} = \frac{1}{(E_b/N_0)_1} + \frac{1}{(E_b/N_0)_2} + \frac{1}{\text{ИМЗ}},$$

где $(E_b/N_0)_1$ — соотношение на линии вверх; $(E_b/N_0)_2$ — соотношение на линии вниз; ИМЗ — уровень интермодуляционных шумов ретранслятора, которые принимаются на уровне 17 дБ.

Таблица 12.9

ФЕС	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
Δ	-0,3	0,9	1,4	1,9	2,1

Соотношение между отношениями E_b/N_0 и $P_{вх}/P_{ш}$ для сигналов ФМ-4, наиболее распространенных в спутниковых линиях связи, зависит от коэффициента избыточного кодирования ФЕС (обычно ФЕС равен 3/4) и определяется следующим образом:

$$E_b/N_0 = P_{вх}/P_i - \Delta.$$

Зависимость Δ от коэффициента избыточного кодирования ФЕС представлена в табл. 12.9.

Приведенные соотношения учитываются при расчетах энергетических параметров спутниковых систем связи.

Вопросы к главе 12

1. Какие основные параметры входят в уравнение связи для спутниковых систем?
2. За счет каких компонентов атмосферы имеет место поглощение сигнала в атмосфере?
3. Что такое эквивалентная длина пути сигнала в атмосфере?
4. Что такое рефракция при распространении сигнала в атмосфере?
5. Чем может быть вызвана неточность наведения остронаправленной антенны земной станции спутниковой связи?
6. К какому эффекту приводит несогласованность поляризации антенн на линии спутниковой связи?
7. Какие эффекты приводят к деполяризации радиоволн в атмосфере при спутниковой связи?
8. Каковы основные источники шумов при приеме сигнала земной станцией спутниковой связи?

Список сокращений

- 16-QAM — Quadrature Amplitude Modulation, шестнадцатипозиционная квадратурная амплитудная модуляция
- 8-PSK — 8 Phase Shift Keying, восьмипозиционная фазовая модуляция
- ACM — Adaptive Coding & Modulation, режим адаптивного кодирования и модуляции
- ALOHA — режим произвольного доступа к каналу
- ADPCM — adaptive differential pulse code modulation, адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция
- AMBE — Advanced Multi Band Excitation, вокодер с многополосным возбуждением
- AOR — Atlantic Ocean Region, Атлантический регион
- APR — Asia Pacific Region, Азиатско-Тихоокеанский регион
- APSK — Amplitude Phase Shift Keying, амплитудно-фазовая манипуляция
- ATM — Asynchronous Transfer Mode, асинхронный метод передачи
- BGAN — Broadband Global Area Network
- BSS — Broadcast Satellite Services, широкоэвещательная спутниковая служба
- CDMA — Code Division Multiple Access, многостанционный доступ с кодовым разделением
- DAMA — Demand Assigned Multiple Access, многостанционный доступ с предоставлением ресурса по требованию
- DSNG — Digital Satellite News Gathering, цифровая спутниковая видеожурналистика
- DVB — Digital Video Broadcasting, цифровое спутниковое вещание
- DVB-RCS — Digital Video Broadcasting, Return Channel for Satellite, цифровое спутниковое вещание со спутниковым обратным каналом
- EBU — European Broadcasting Union, Европейский союз радиовещания
- ETSI — European Telecommunications Standards Institute, Европейский институт телекоммуникационных стандартов
- FAS — Frame Alignment Signal, сигнал кадровой синхронизации
- FDMA — Frequency Division Multiple Access, многостанционный доступ с частотным разделением
- FEC — Forward Error Correction, упреждающее исправление ошибок
- FH-CDMA — Frequency Hopping Code Division Multiple Access, многостанционный доступ с кодовым разделением со скачкообразной перестройкой частоты
- FTDMA — Frequency Time Division Multiple Access, многостанционный доступ с частотно-временным разделением
- GEO — Geosynchronous (geostationary) Equatorial Orbit, геостационарная орбита
- GMSK — Gaussian filtered minimum shift keying, or gaussian minimum shift keying, гауссовская частотная модуляция с минимальным сдвигом
- GPS — Global Positioning System, глобальная система позиционирования
- HDTV — High Definition Television, телевидение высокой четкости
- HES — Hybrid Earth Station, земная станция, использующая различные технологии доступа
- HUB — центральная земная станция
- IBS — Intelsat Business Services, служба передачи цифровых потоков в СССР Интелсат

- IDR — Intermediate Date Rate, служба передачи цифровых потоков в СССР
Интелсат
- IOR — Indian Ocean Region, Индийский океанский регион
- IQ — Inphase Quadrature, общее название модулированных сигналов, формируемых квадратурным методом
- ISDN — Integrated Services Digital Network, цифровая сеть интегрального обслуживания
- ITU — International Telecommunications Union, Международный союз электросвязи
- Ka — название диапазона частот 20/30 ГГц
- Ku — название диапазона частот 11/14 ГГц
- LAN — Local Area Network, локальная сеть
- LDPC — low-density parity-check codes, коды с низкой плотностью проверок на четность
- LEO — Low Earth Orbit, низкие орбиты (500...1500 км)
- MCPC — Multi Channel Per Carrier, много каналов на несущей
- MEO — Median Earth Orbit, средневысотные орбиты
- MF-TDMA — Multi Frequency-Time Division Multiple Access, многостанционный доступ с временным разделением при использовании многих несущих частот
- MFAS — Multi Frame Alignment Signal, сигнал сверхкадровой синхронизации
- MPEG — Motion Picture Experts Group, группа экспертов Международной организации стандартизации
- MSK — Minimum (frequency) Shift Keying, частотная модуляция с минимальным сдвигом
- MTBF — Mean Time Between Failure, среднее время наработки на отказ
- OFDM — orthogonal frequency-division multiplexing, ортогональное частотное мультиплексирование
- OQPSK — Offset QPSK, квадратурная фазовая модуляция со сдвигом (офсетная модуляция)
- PCMA — Paired Carrier Multiple Access, метод двоемной несущей (Carrier-in-Carrier)
- PDH — Plesiosynchronous Digital Hierarchy, плезियोхронная цифровая иерархия
- PES — Packetized Elementary Stream, пакетированный элементарный поток
- PES — Personal Earth Station, персональная наземная станция
- PID — Packet Identifier, идентификатор пакета
- POR — Pacific Ocean Region, Тихоокеанский регион
- QPSK — Quadrature Phase Shift Keying, Quaternary Phase Shift Keying, квадратурная четырехфазная модуляция (ФМ-4)
- SCPC — Single Channel Per Carrier, один канал на несущую (ОКН)
- SDH — Synchronous Digital Hierarchy, синхронная цифровая иерархия
- SDTV — Standard Definition Television, телевидение стандартной четкости
- SIT — Satellite Interactive Terminal, интерактивный спутниковый терминал
- SS7 — Signalling System No.7, система сигнализации номер 7
- STM-N — Synchronous Transport Module level N, синхронный транспортный модуль уровня N
- STS-N — Synchronous Transport Signal level N, синхронный транспортный сигнал уровня N
- TCM — Trellis-Coded Modulation, треллис-кодирование, решетчатое кодирование

- TDM — Time Division Multiplexing, временное разделение каналов (ВРК)
TDMA — Time Division Multiple Access, многостанционный доступ с временным разделением (МДВР)
UMTS — Universal Mobile Telecommunications System, стандарт мобильной связи третьего поколения
UNI — User Network Interface, пользовательский интерфейс
VSAT — very small aperture terminal, сеть спутниковой связи с терминалами малого размера
VSELP — Vector Sum Excited Linear Predictive, вокодер с векторным возбуждением
WAN — Wide Area Network, региональные сети
WLL — Wireless Local Loop, беспроводной абонентский шлейф
АВТ — антенно-волноводный тракт
АРУ — автоматическая регулировка усиления
АФМ — амплитудно-фазовая модуляция
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
БРТК — бортовой радиотехнический комплекс
БРТР — бортовой ретранслятор
ВЧХ — Код Боуза–Чоудхури–Хоквингема
ВАКР — Всемирная административная конференция радиосвязи
ВОЛС — волоконно-оптическая линия связи
ВЭО — высокоэллиптическая орбита
ГВЗ — групповое время задержки (запаздывания)
ГСО — геостационарная орбита
ДМТ — дискретная многотоновая модуляция
ЗС — земная станция
ИКМ — импульсно-кодовая модуляция (PCM)
ИСЗ — искусственный спутник Земли
КА — космический аппарат
КС — космическая станция
МД — множественный (многостанционный) доступ
МДВР — многостанционный доступ с временным разделением (TDMA)
МДКР — многостанционный доступ с кодовым разделением (CDMA)
МДПКТ — множественный доступ с предоставлением каналов по требованию (DAMA)
МДЧР — многостанционный доступ с частотным разделением (FDMA)
МКРЧ — Международный комитет радиочастот
ММС — модуляция с минимальным сдвигом (MSK)
МПТВ — многопользовательское телевизионное вещание
МПЧ — максимально применимые частоты
МСС — мобильные спутниковые системы
МСЭ — Международный союз электросвязи (ITU)
МТС — междугородная телефонная станция
МШУ — маломощный усилитель
НТВ — непосредственное телевизионное вещание
ОКН — один канал на несущую (SCPC)
ОКС7 — общий канал системы сигнализации №7
ОЧМ — ортогональное частотное мультиплексирование
ПКТ — предоставление канала по требованию
ПСР — псевдослучайная последовательность
ПСС — подвижная спутниковая служба

- ПЦИ — плезеохронная цифровая иерархия (PDH)
РКП — коэффициент развязки кроссполаризационных сигналов
РАСС — радиорелейные системы связи
РПУ — радиоприемное устройство
РСС — радиовещательная спутниковая служба
РТР — ретранслятор
СВЧ — сверхвысокие частоты
СИТ — спутниковый интерактивный терминал (SIT)
СПКТ — система с предоставлением каналов по требованию
СПСС — система подвижной спутниковой связи
 СС — спутниковая система
 ССС — система спутниковой связи
СЦИ — синхронная цифровая иерархия (SDH)
УПЧ — усилитель промежуточной частоты
ФАПЧ — фазовая автоподстройка частоты
 ФМ — фазовая модуляция
ФМ-4 — четырехпозиционная фазовая модуляция (QPSK)
ФСС — фиксированная спутниковая служба
ФЧХ — фазочастотная характеристика
ЦЗС — центральная земная станция
 ЧМ — частотная модуляция
 ЩД — шумовая добротность
ШПС — шумоподобный сигнал
ЭВК — энергетический выигрыш кодирования
ЭИИМ — эквивалентная изотропная излучаемая мощность
ЭМД — электромагнитная доступность

Литература

1. Спутниковая связь и вещание: справочник / Под ред. Л.Я. Кантора. — М.: Радио и связь, 1997. — 528 с.
2. Чернявский Г.М., Вартенев В.А. Орбиты спутников связи. — М.: Связь, 1978.
3. Спутниковые сети связи: Учеб. пособие/В.Е. Камнев, В.В. Черкасов, Г.В. Чечин. — М.: Альпина Паблишер, 2004. — 536 с.
4. Регламент радиосвязи. — М.: Радио и связь, 1985.
5. Кантор Л.Я., Минашкин В.П., Тимофеев В.В. Спутниковое вещание. — М.: Радио и связь, 1981. — 232 с.
6. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. — М.: Связь, 1979.
7. Материалы сервера www.intelsat.com
8. Сомов А.М. Расчет антенн земных станций спутниковой связи. — М.: Горячая линия-Телеком, 2011.
9. Калинин А.И. Влияние дождя на ослабление радиоволн для ИСЗ // Электросвязь. 1976. № 5.
10. Спутниковые системы связи и вещания. Ежегодник 1999-2000/под ред. В.А. Анпилогова. — М.: Радиотехника, 2000.
11. Акимов А.А. Особенности размещения наземных станций в системах связи через негеостационарные ИСЗ // Электросвязь. 1998. № 2.
12. Голдсмит А. Беспроводные коммуникации. — М.: Техносфера, 2008. — 904 с.
13. Ипатов В. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. — М.: Техносфера, 2007. — 488 с.
14. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. Пер. с англ./Под ред. В.И. Журавлева. — М.: Радио и связь, 2000. — 520 с.
15. Григорьев В.А., Передача сигналов в зарубежных информационно-технических системах. — СПб: ВАС, 1998.
16. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ./Под ред. Д.Д. Кловского. — М.: Радио и связь, 2000.
17. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование/ Методы и алгоритмы. Справочник. — М.: Горячая линия Телеком, 2004.
18. Карташевский В.Г., Мишин Д.В. Прием кодированных сигналов в каналах с памятью.— М.: Радио и связь, 2004.
19. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. — М.: Техносфера, 2005.
20. Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф. Цифровая обработка и передача речи / Под ред. О.И. Шелухина. — М.: Радио и связь, 2000. — 465 с.
21. Шалимов И.А. Современные методы передачи речи. Курс лекций. — М.: в/ч 33965, 2000. — 132 с.

22. Цифровая телефония: системы цифровой интерполяции речи. Учебно-методическое пособие / С.Ф. Корнев, В.Ф. Малышко, В.А. Нагирный, В.Д. Сахончик. — М.: в/ч 33965, 1998.
23. Материалы сервера www.compression.ru
24. Кислицын А.С. Корпоративные спутниковые информационные сети на основе VSAT-технологий. Методология построения/Под ред. проф. Е.М. Сухарева и Ю.А. Подъездкова. — М.: Радиотехника, 2007. — 345 с.
25. Пехтерев С.В., Андреев А.В. Ермаков Е.Ю. Выбор технологии и системы спутниковой связи для корпоративной или ведомственной сети // Сети и системы связи. 2002. № 2 (80).
26. Анпилогов В.Р., Эйдус А.Г. Сети VSAT: обзор технологий и сфер применения. — Материалы сервера www.VSAT-tel.ru
27. Мультисервисная DVB-RCS платформа MediaSputnik 2000 series. Общее описание. — Материалы сервера www.DVB-RCS.ru
28. Материалы сервера www.VSATinfo.ru
29. Satellite Mobile System Architectures. Report of The R&D Group of the Advanced Satellite Mobile System Task Force. Ref.: Doc ASMS-TG-ArchTechnical Group Version 2: Rev. July 02.
30. Материалы сервера www.inmarsat.com
31. Материалы сервера www.globalstar.com
32. Беллами Дж. Цифровая телефония: Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Берлина, Ю.Н. Чернышова. — М.: Эко-Трендз, 2004. — 640 с.
33. Зубарев Ю.Б., Кривошеев М.И., Красносельский И.Н. Цифровое телевизионное вещание. Основы, методы, системы. — М.: Научно-исследовательский институт радио (НИИР), 2001. — 568 с.
34. Методы информационного сжатия в телевидении. — Национальная Ассоциация Телевещателей, 1997 г.
35. Левченко В.Р. Спутниковое телевидение. — С-Пб.: ВHV, 1998.
36. ISO/IEC 13818. Международный стандарт MPEG-2 («Информационная технология — Обобщенное кодирование движущихся изображений и сопровождающей звуковой информацией»).
37. Энергетические характеристики космических радиолиний / Под ред. О.А. Зенкевича. — М.: Советское радио, 1972. — 436 с.

Оглавление

Введение	3
1. Принципы построения спутниковых систем связи	5
1.1. Основные понятия	5
1.2. Виды орбит. Основные определения. Состав и назначение систем спутниковой связи	10
1.3. Общие вопросы структурно-функционального построения систем спутниковой связи и её составных частей ..	16
1.3.1. Состав системы	16
1.3.2. Требования к космическому сегменту	16
1.3.3. Требования к земному сегменту	17
1.4. Основные параметры систем спутниковой связи	18
1.4.1. Параметры земных станций	18
1.4.2. Основные показатели космических станций	19
1.4.3. Основные показатели систем спутниковой связи	21
1.5. Состав земных и космических станций	22
1.6. Диапазоны частот, выделенные для спутниковой связи и вещания, и регулирование их использования	24
1.6.1. Распределение полос частот между службами	27
1.6.2. Международная координация использования частот спутниковыми системами	27
1.6.3. Особенности выбора рабочих частот для радиолиний спутниковой связи	30
1.6.4. Литерные обозначения диапазонов частот спутниковой связи и сложившееся распределение частот между системами различного назначения	33
1.6.5. Тенденции использования диапазонов частот	34
2. Службы спутниковой связи	36
2.1. Фиксированная служба связи	36
2.2. Подвижная спутниковая связь	37
2.3. Радиовещательная спутниковая связь	40
2.4. Персональная широкополосная спутниковая связь	41
3. Виды спутниковых ретрансляторов	43
3.1. Схемы ретрансляторов	43
3.2. Применение многолучевых бортовых антенн	46
3.3. Межлучевая коммутация	47
3.4. Нелинейное усиление ретрансляторов	49
3.5. Поляризация излучений КА	50
3.6. Зоны обслуживания	52

4. Электромагнитная доступность к спутниковым линиям связи	57
4.1. Возможность электромагнитного доступа.....	57
4.2. Помехи в приемном тракте станции космической связи.....	60
4.3. Шумы приемного устройства.....	65
4.4. Геометрические характеристики, определяющие взаимное положение спутника и земной станции.....	70
4.5. Особенности энергетики спутниковых линий связи....	72
5. Методы многостанционного доступа и предоставления каналов	75
5.1. Виды многостанционного доступа.....	75
5.2. Многостанционный доступ с частотным разделением.....	75
5.3. Многостанционный доступ с временным разделением сигналов.....	76
5.4. Многостанционный доступ с кодовым разделением сигналов.....	78
5.5. Метод двоянной несущей.....	81
5.6. Методы предоставления каналов в сетях спутниковой связи.....	83
5.6.1. Многостанционный доступ с фиксированным закреплением каналов.....	84
5.6.2. Произвольный доступ.....	84
5.6.3. Многостанционный доступ с предоставлением каналов по требованию.....	89
6. Виды модуляции и помехоустойчивого кодирования в спутниковых системах связи	94
6.1. Особенности сигналов дискретной модуляции.....	94
6.1.1. Квадратурный метод формирования сигналов амплитудно-фазовой модуляции.....	94
6.1.2. Модуляционное кодирование.....	96
6.1.3. Код Грея.....	96
6.1.4. Дифференциальное кодирование.....	97
6.1.5. Офсетная модуляция.....	99
6.1.6. Формирование сигналов частотной модуляции квадратурным способом. Модуляция с минимальным сдвигом.....	100
6.1.7. Решетчатое кодирование.....	101
6.1.8. Фильтрация модулированных сигналов.....	103
6.2. Помехоустойчивое кодирование в системах спутниковой связи.....	105
6.2.1. Классификация помехоустойчивых кодов.....	105
6.2.2. Основные характеристики методов коррекции ошибок.....	108

6.2.3. Свёрточные коды	110
6.2.4. Блочные коды	111
6.2.5. Каскадные схемы кодирования	112
6.2.6. Турбокоды	113
6.2.7. Коды LDPC	114
6.2.8. Перемежители	115
6.3. Сравнение эффективности различных видов модуляции и помехоустойчивого кодирования	117
6.4. Современные спутниковые модемы	117
6.4.1. Основные параметры модемов	118
6.4.2. Сравнительный анализ современных образцов оборудо- вания	122
7. Сокращение информационной избыточности	126
7.1. Классификация методов сжатия информационных сиг- налов	126
7.2. Классификация и описание принципов действия совре- менных речевых кодеков	128
7.2.1. Кодеры формы	130
7.2.2. Параметрическое кодирование	133
7.2.3. Параметры цифровых потоков современных систем ко- дирования речи	135
7.3. Основные стандарты компрессии цифрового видео	138
7.3.1. Краткое описание алгоритма сжатия видеосигнала в стандарте MPEG-2	140
7.3.2. Требования к стандарту видеоконпрессии нового по- коления	142
7.4. Сокращение избыточности при передаче многоканаль- ных цифровых телефонных потоков	143
7.4.1. Оборудование динамического мультиплексирования .	143
7.4.2. Статистическое мультиплексирование	145
7.5. Сжатие заголовков TCP/IP	146
8. Особенности и перспектива развития VSAT сетей	150
8.1. Общие сведения о спутниковых сетях связи VSAT	150
8.1.1. Отличие VSAT-сетей от локальных или наземных ре- гиональных компьютерных сетей	150
8.1.2. Типы сетей VSAT	152
8.2. Технологии, используемые в сетях VSAT для создания корпоративных сетей	154
8.2.1. Топология сетей связи	156
8.2.2. Особенности организации ведомственной телефонной связи с помощью сетей VSAT	159

8.3. Мультисервисная DVB-RCS платформа для сетей VSAT	161
9. Особенности мобильных спутниковых систем	170
9.1. СПСС Inmarsat	170
9.2. СПСС Thuraya	172
9.3. СПСС Iridium	176
9.4. СПСС GlobalStar	177
9.5. Узкополосные системы мобильной спутниковой связи	178
9.6. Региональные системы мобильной спутниковой связи	180
9.7. Перспективы развития мобильной спутниковой связи	180
10. Технологии формирования цифровых потоков	183
10.1. Плезиохронная цифровая иерархия	183
10.2. Проблемы использования технологии АТМ в спутниковых системах связи	190
11. Цифровое спутниковое телевизионное вещание	197
11.1. Основные системы цифровой передачи многопользовательского телевидения	197
11.2. Особенности обработки сигналов DVB-S на физическом и канальном уровне	199
11.3. Стандарт DVB-S2. Система цифрового ТВ вещания второго поколения	205
12. Энергетические соотношения на линии ССС с применением ГСО	212
12.1. Особенности энергетики спутниковых линий	212
12.2. Уравнения связи для спутниковых линий	213
12.3. Поглощение энергии сигнала в атмосфере	216
12.4. Влияние рефракции и неточности наведения антенн	220
12.5. Фазовые эффекты в атмосфере	222
12.6. Потери из-за несогласованности поляризаций антенн	223
12.7. Деполяризация радиоволн в атмосфере	224
12.8. Шумы атмосферы, земной поверхности, планет и приемных систем	225
12.9. Расчет шумов в каналах спутниковых радиолиний	231
Список сокращений	234
Литература	238

Вышли в свет и имеются в продаже:

Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи

/ О. П. Фролов, В. П. Вальд. – М.: Горячая линия–Телеком, 2008. – 496 с.: ил., ISBN 978-5-9912-0002-8.

Изложены основные вопросы по проблематике зеркальных антенн для земных станций спутниковой связи (ЗССС): взаимосвязь параметров антенн и параметров систем спутниковой связи, методы расчетов зеркальных антенн, практически исчерпывающая информация об облучателях антенн, вопросы влияния конструктивных элементов антенны на ее характеристики излучения, оценка характеристик излучения зеркальных антенн в ближней зоне, методы измерения параметров антенн для ЗССС.

Для специалистов по спутниковой связи и антенной технике, может быть полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в области антенной техники.

Метод фрагментации для расчёта шумовой температуры антенн

/ А. М. Сомов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 208 с.: ил., ISBN 978-5-9912-0073-8.

В книге излагается метод расчёта воздействия тепловых шумов окружающего пространства на шумовую температуру антенн земных станций спутниковой связи. Пространство в виде почвы и воздушной атмосферы для произвольного угла наклона антенны к горизонту разделено на секторы, в которых воздействие того или иного фактора строго определено. Для повышения точности расчётов яркостная шумовая температура окружающей среды определяется в той же сферической системе координат, что и диаграмма направленности антенны. Рассматриваются особенности расчёта

шумовой температуры одно- и двухзеркальных антенн, многолучевых одно- двух- и многозеркальных антенн, лучеводов, а так же фазированных антенных решёток. Приведены программы для расчёта.

Для специалистов по спутниковой связи и антенной технике, может быть полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в области антенной техники.

Антенно-фидерные устройства:

Учебное пособие / А. М. Сомов, В. В. Старостин, Р. В. Кабетов. Под ред. А. М. Сомова. – М.: Горячая линия–Телеком, 2011. – 404 с.: ил., ISBN 978-5-9912-0152-0.

Книга представляет собой классический курс антенно-фидерных устройств. В учебном пособии на современном уровне изложены общие вопросы теории приемных и передающих антенн, теории антенных решеток, рассмотрены многочисленные антенны, начиная с простейшего диполя и щелевой антенны и заканчивая сложными зеркальными антеннами, указаны особенности антенн для линий связи различных диапазонов частот. Особое внимание уделено вопросам высокочастотного питания антенн и элементам волноводной техники.

Для студентов, обучающихся по специальностям 090106 – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», 090107 – «Противодействие техническим разведкам», направлению подготовки 090900 – «Информационная безопасность» (профиль «Безопасность телекоммуникационных систем»), будет полезна студентам телекоммуникационных и радиотехнических специальностей, аспирантам и специалистам в области инфокоммуникаций.