



АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

С. В. Абламейко
В. А. Саечников
А. А. Спиридонов

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Пособие для студентов факультетов
радиофизики и компьютерных технологий,
механико-математического и географического

МИНСК
БГУ
2012

УДК 629.783(075.8)
ББК 39.67я73-1
А13

Серия основана в 2011 году

Рекомендовано советом
факультета радиофизики и компьютерных технологий
27 ноября 2012 г., протокол № 4

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В. В. Голенков*;
кандидат физико-математических наук, доцент *И. Э. Хейдоров*

Абламейко, С. В.

А13 **Спутниковые системы связи : пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютерных технологий, мех.-мат. и геогр. / С. В. Абламейко, В. А. Саечников, А. А. Спиридонов. — Минск : БГУ, 2012. — 147 с. : ил. — (Аэрокосмические технологии). ISBN 978-985-518-775-3.**

Рассматриваются принципы построения и функционирования спутниковых систем связи. Дается краткое описание международных глобальных и региональных систем связи. Описываются ключевые технологии и перспективы развития спутниковых систем связи.

Для студентов БГУ, обучающихся на факультетах радиофизики и компьютерных технологий, механико-математическом, географическом.

**УДК 629.783(075.8)
ББК 39.67я73-1**

ISBN 978-985-518-775-3

© Абламейко С. В., Саечников В. А.,
Спиридонов А. А., 2012
© БГУ, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Роль аэрокосмических технологий в жизни современного общества в XXI в. постоянно возрастает. Спутниковая связь имеет огромный потенциал применения в новых областях: от подвижной персональной связи, широкополосного доступа к Интернету, мультимедийного вещания, высокоскоростного обмена корпоративной информацией до определения местоположения абонентов мобильной связи.

Важным направлением в Национальной космической программе Беларуси, которую планируется осуществить в пятилетний период (2013–2017), является создание национальной системы спутниковой связи и вещания на основе геостационарных спутников. В результате реализации таких проектов Национальной космической программы, как разработка коммерческой системы спутниковой связи совместно с Российской Федерацией, а также белорусско-китайского геостационарного спутника связи, предусматривается внедрить новые технологии, увеличить объемы услуг связи, оказываемых населению и органам государственного управления, снизить стоимость и повысить их качество.

Кроме коммерческих целей предоставления телекоммуникационных услуг отечественным и зарубежным потребителям, спутниковая система связи позволит решить задачи по обеспечению национальной безопасности государства, а также повысить информационную безопасность Республики Беларусь и расширить ее информационное присутствие в других регионах, обеспечит широкополосной защищенной связью органы государственного управления, дипломатические и торговые представительства, дополнит и объединит

нит существующие сети связи, даст возможность удовлетворить социально-экономические потребности населения в телефонной связи, Интернете, цифровом телевидении на всей территории республики, увеличит экспортный потенциал услуг связи за счет сдачи в аренду ресурса спутника зарубежным потребителям, ускорит процесс интеграции Республики Беларусь в мировое информационное сообщество, повысит эффективность реализации государственных программ и существенно ускорит их выполнение.

1. ВИДЫ РАДИОСВЯЗИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ. МЕСТО И РОЛЬ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Среди радиосистем передачи информации (РСПИ) различают два основных вида радиосвязи – *космическую* и *наземную*.

Космическая радиосвязь – это радиосвязь, в которой используется одна или несколько космических радиостанций, либо пассивные спутники, либо другие космические объекты.

Спутниковая радиосвязь – это космическая радиосвязь между земными радиостанциями, осуществляемая путем ретрансляции радиосигналов через один или несколько спутников Земли. Принадлежность наземных и спутниковых РСПИ к той или иной службе связи устанавливают, как это показано на рис. 1.

Наземная радиосвязь – радиосвязь, в которой применяют радиостанции, находящиеся на поверхности Земли и в основной части земной атмосферы, исключая космическую радиосвязь и радиоастрономию.

Принцип построения систем спутниковой связи (ССС) иллюстрирует рис. 2. В состав любой ССС входит два одинаковых по назначению элемента:

- *космический сегмент* – *космические станции (КС)*, представляющие собой ретрансляционное (приемо-передающее) устройство, размещенное на космическом аппарате (КА), с антеннами для приема и передачи радиосигналов и системами обеспечения их работы, источниками энергоснабжения, системами ориентации антенн (на Землю) и солнечных батарей (на Солнце), системами коррекции положения КА на орбите, терморегулирования и т. д.;

- *наземный сегмент* – приемо-передающие земные станции (ЗС), контрольные ЗС и ЗС системы управления КА, а также центр управления системой связи (ЦУС).

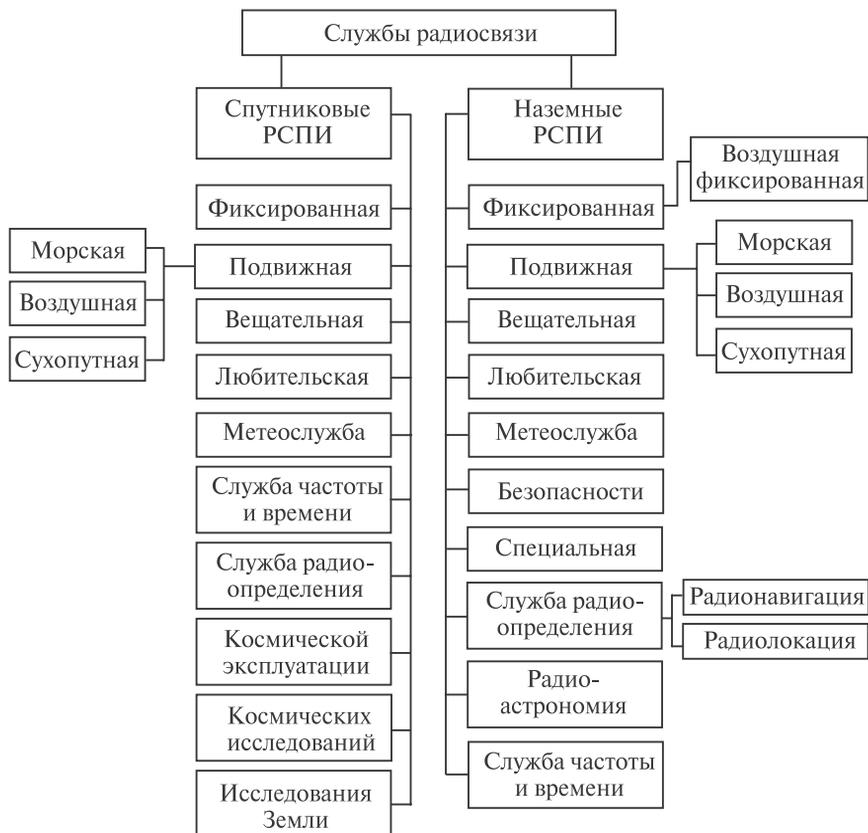


Рис. 1. Классификация РСПИ по принадлежности к той или иной службе и назначению

Спутниковая линия – линия связи между ЗС с помощью одного КА – на каждом направлении включает в себя участок Земля – спутник (линия вверх) и участок спутник – Земля (линия вниз). Земные станции соединяются с узлами коммутации сети связи (наземные каналы связи), с источниками и потребителями программ телевидения, звукового вещания и т. д.

Контрольные ЗС контролируют режим работы ретранслятора КС, соблюдение важных для работы всей сети показателей: излучаемой мощности, частоты передачи, поляризации, качества модулирующего сигнала и т. п. Часто функции контрольной станции возлагаются на одну из передающих или приемо-передающих станций сети – *центральную станцию (ЦС)*.

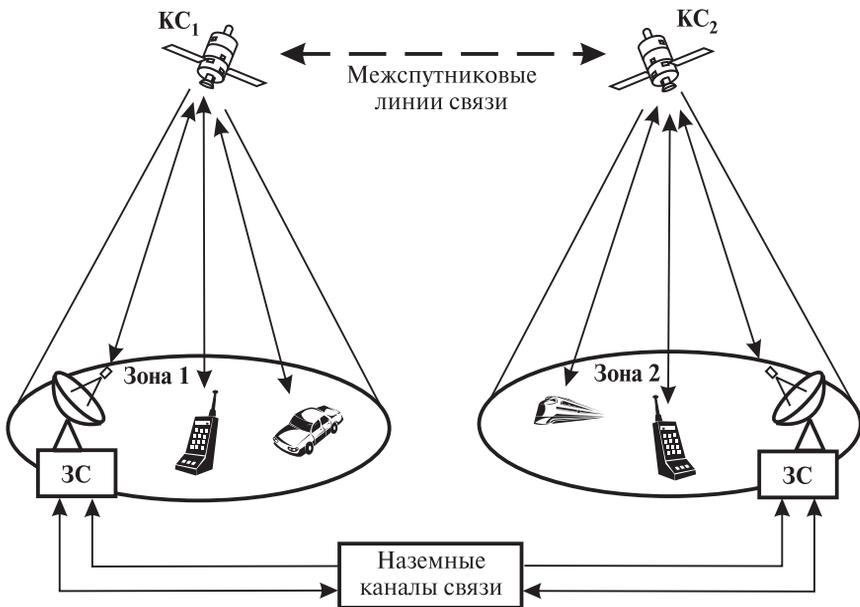


Рис. 2. Принцип построения ССС

Центральные и контрольные станции сети обычно имеют возможность обмена информацией со станциями сети по специально создаваемой подсистеме *служебной связи*. Зачастую эта подсистема использует тот же искусственный спутник Земли (ИСЗ), через который работает основная сеть, но в некоторых случаях используются наземные каналы служебной связи.

Земные станции командно-измерительной системы (КИС) осуществляют управление функционированием всех подсистем КА, контроль за их состоянием, выводом ИСЗ на орбиту при первоначальных испытаниях и вводе в эксплуатацию КС.

Принцип работы ССС. Промежуточный ретранслятор размещается на КА. При достаточно высокой орбите КА виден с очень большой территории (около одной трети поверхности Земли), поэтому через его бортовой ретранслятор могут непосредственно связаться любые станции, находящиеся на этой территории. Трех КА в принципе достаточно для создания почти глобальной системы связи. В то же время современные технические средства позволяют сформировать достаточно узкий луч, чтобы при необходимости сконцентрировать энергию передатчика КА на ограниченной площади. Это создает возможность эффективно использо-

вать КА также и для обслуживания небольших зон. По указанным причинам спутниковая связь, начавшая свое развитие в середине 60-х гг. XX в. с появлением советского спутника «Молния» и американского «Телстар», стала быстро развиваться во всем мире. Создано большое число систем спутниковой связи и вещания, различных по функциям, обслуживаемой зоне, составу, емкости, типу земных станций.

Наибольшее распространение получили следующие спутниковые РСПИ:

- *фиксированная спутниковая служба (ФСС)* – служба радиосвязи между ЗС, расположенными в определенных, фиксированных пунктах, при использовании одного или нескольких спутников;

- *подвижная спутниковая служба (ПСС)* – между подвижными ЗС (или между подвижными и фиксированными ЗС) с участием одного или нескольких КА (в зависимости от места установки подвижной ЗС различают *сухопутную, морскую, воздушную ПСС*);

- *радиовещательная спутниковая служба (РСС)* – служба радиосвязи, в которой сигналы КА предназначены для *непосредственного приема* программ населением. При этом непосредственным считается как *индивидуальный*, так и *коллективный* прием; в последнем случае программа вещания доставляется индивидуальным абонентам с помощью той или иной наземной системы распределения – кабельной или эфирной – передатчиком небольшой мощности.

Помимо *принадлежности* к той или иной службе и назначению (классификация РСПИ может быть проведена и по другим признакам, которые заложены в ее основу, например *по диапазону используемых частот, виду линейного сигнала, виду модуляции несущей, способу разделения каналов* и т. д.

Кроме того, одним из таких признаков является *характер используемого физического процесса* в тракте распространения радиоволн. По этому признаку различают:

- *радиорелейные системы передачи прямой видимости (РРСИ)* (распространение радиоволн в тропосфере в пределах прямой видимости);

- *тропосферные радиорелейные системы передачи (ТРСИ)* (дальнее тропосферное распространение радиоволн вследствие их рассеяния и отражения в нижней области тропосферы при взаимном расположении радиорелейных станций за пределами прямой видимости);

- *ионосферные системы передачи на декаметровых волнах* (дальнее распространение декаметровых волн за счет отражения от слоев ионосферы);

- *космические системы передачи* (прямолинейное распространение радиоволн в космическом пространстве и атмосфере Земли);

- *ионосферные системы передачи на метровых волнах* (дальнее распространение метровых волн благодаря рассеянию их на неоднородностях ионосферы);

- *наземные системы ВЧ, ОВЧ и УВЧ*, работающие в приземных слоях атмосферы в диапазонах частот от 30 до 3000 МГц и др.

Радиорелейные системы передачи прямой видимости и спутниковые системы связи по способу построения имеют много общего:

- и в том, и в другом случаях используется прямолинейное распространение радиоволн с ретрансляцией сигналов бортовым ретранслятором ИСЗ, находящегося в пределах радиовидимости земных станций, между которыми осуществляется радиосвязь, либо сигналов наземных радиостанций;

- и в РРСП, и в ССС применяют многоствольный принцип построения ретрансляторов, обеспечивающий повышение пропускной способности, надежности и значительное снижение экономических затрат;

- близки также и диапазоны частот, в которых работают эти системы. В частности, большинство земных станций ССС работает в диапазонах 4/11 ГГц на прием и 6/14 ГГц на передачу, а такие РРСП, как, например, «Курс-8» и «Электроника-Связь-11-Ц» работают в диапазонах 7,9–8,4 и 10,7–11,7 ГГц соответственно.

Системы связи можно также классифицировать и *по пользовательским признакам*, например по категории обслуживаемых абонентов: на системы общего, индивидуального и специализированного пользования, по числу обслуживаемых абонентов, а также по виду предоставляемых услуг.

В последние два десятилетия интенсивное развитие получили так называемые *сотовые системы мобильной связи*, которые условно можно выделить в отдельную категорию РСПИ, хотя формально они относятся к службе ПСС.

В настоящее время наблюдается слияние средств телерадиовещания, телекоммуникаций и компьютерных технологий в *единые информационные среды* с целью предоставления пользователям новых и более совершенных видов услуг.

Последнее десятилетие XX в. наглядно продемонстрировало, что *спутниковая связь*, находясь в тисках конкурентной борьбы с волоконно-оптическими линиями связи, кабельным телевидением и системами сотовой связи, упорно отстаивает свое место под солнцем и благоустраивает нишу, недоступную для альтернативных способов передачи сигналов. Как показывают различные маркетинговые анализы и прогнозы, ми-

ровой рынок спутниковой связи в ближайшие 5–10 лет будет развиваться значительными темпами.

Среди многих областей применения спутниковых технологий связь и радиотелевизионное вещание имеют наибольшую коммерческую нагрузку. Не менее важны, но менее доходны такие области применения, как дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и координатно-временное обеспечение. Общий объем спутниковой индустрии составляет более 100 млрд долл. при ежегодном приросте в десятки процентов.

В настоящее время спутниковая связь в основном оказывает услуги международной, междугородной и сельской телефонии, услуги корпоративным пользователям (VSAT), услуги по распределению телевизионных программ для дальнейшего их распространения по кабельным и эфирным каналам, а также по доставке сигнала к ретрансляторам УВЧ/ОВЧ/СВЧ. Кроме того, это услуги непосредственного спутникового телевизионного вещания, мультимедиа и Интернета, спутниковой подвижной и персональной связи, репортажи с мест событий, спутниковый сбор новостей, подвижная связь Euteltracs и др.

Вообще, системы спутниковой связи дороже наземных. Необходимо подчеркнуть, что проблема спутниковой связи и вещания имеет несколько важных аспектов.

В первую очередь – это технический аспект, который предусматривает создание и вывод на орбиту многоствольных спутников-ретрансляторов с узконаправленными антеннами, создание земных передающих пунктов, производство простых приемных устройств массового пользования. Решение таких технических задач требует применения самых современных технологий и средств космической техники.

Важную роль играет и второй – экономический – аспект. Поскольку средства связи и вещания являются массовыми и в зависимости от размеров зоны обслуживания могут содержать миллионы наземных приемных устройств. Поэтому важное значение придается экономической оптимизации, которая позволяет сделать земные средства связи и распределения телевизионных программ наиболее эффективными и недорогими и, таким образом, снизить затраты на создание всей системы.

Третий аспект – международный. При создании практически любой национальной системы спутниковой связи (вещания) не удастся локализовать ее деятельность только внутри зоны обслуживания. Наиболее важна и необходима международная координация спутниковых систем, которая предусматривает четко спланированное использование геостационарной орбиты, и регламентация ряда параметров искусственных спутников Земли и земных станций, которые влияют на электромагнитную совместимость с другими службами и системами.

2. СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

2.1. Классификация, назначение, виды и основные характеристики спутниковых систем связи

Идея осуществления связи через спутники восходит к окончанию Второй мировой войны, когда 28-летний офицер ВВС Англии Артур Кларк написал статью об использовании геостационарных спутников связи, опубликованную в журнале *Wireless World*. Он рассчитал, что на высоте около 35 тыс. км над экватором угловая скорость вращения спутника равна скорости вращения Земли, следовательно, спутник будет находиться в неподвижном состоянии относительно Земли. Первые спутниковые системы связи с активной ретрансляцией сигналов появились в 1962–1963 гг., а спутниковые системы дальней связи – в 1965 г. («Интелсат», США; «Молния-1», СССР).

В последующие годы были созданы ведомственные, национальные и международные системы, которые в зависимости от передаваемой информации можно отнести либо к *многофункциональным*, либо к *специализированным*. Первые предназначены для одновременного обмена телефонной, телеграфной, телевизионной, радиовещательной и другими видами информации; вторые – для передачи информации одного или двух однородных видов, например теле- и радиовещания. К специализированным ССС также можно отнести ряд систем военного и гражданского применения, которые предназначены для решения задач определенного рода. Некоторые из таких систем приведены в табл. 1.

В настоящее время ССС охватывают практически все существующие службы связи, они интегрированы со многими другими системами и этот процесс интеграции непрерывно продолжается.

Многофункциональная система спутниковой связи и вещания, представленная на рис. 3, включает сеть наземных станций, часть которых (ЗС2) – чисто приемные – входит только в систему вещания, часть (ЗС1, ЗС3) – прямо-передающие – служат для передачи программ вещания и для организации междугородной телефонной связи. Сигналы из центра формирования программ (ЦФП) и междугородной телефонной станции (МТС) через прямо-передающую станцию ЗС поступают на бортовой ретранслятор, имеющий стволы для передачи телефонных сигналов, телевизионных и радиовещательных программ (ТФ, ТВ, РВ). Принятые наземными станциями сигналы от бортового ретранслятора поступают на радиотелевизионные ретрансляторы (РТР), телецентры (ТЦ) и МТС.

Специализированные ССС

Назначение	Название ССС
Гражданская дальняя связь: международная региональная	INTELSAT Arik, Satconn, Westar, «Молния»
Вещательная	ATS-6, CTS, OTS, «Орбита»
Связь с объектами военного назначения	NATO, DSCS-III, Skynet
Связь с морскими объектами: международная региональная	INMARSAT MARISAT, Marots
Связь с воздушными судами	AEROSTAT
Персональная связь	Iridium, Odyssey, «Сигнал», «Ростелекат»
Спасательная служба	Kospas, «Курс»
Навигация (глобальная)	GPS(Navstar), ГЛОНАСС
Исследование космического пространства	TDRSS, Meteosat, «Космос»
Исследование Земли	Landsat, Seasat, «Алмаз»
Радиолюбительская	Oscar

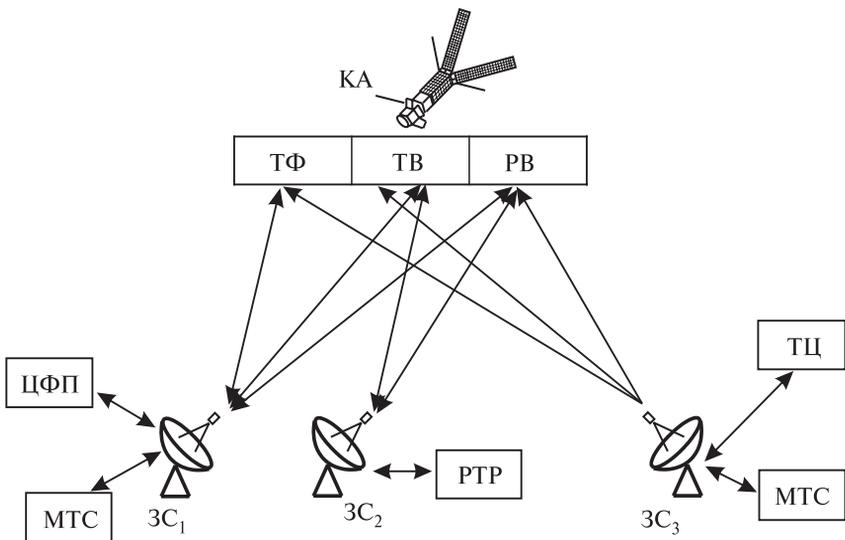


Рис. 3. Многофункциональная система спутниковой связи и вещания

Использование излучаемого КА сигнала сетью приемных установок и сравнительная простота последних делают спутниковые системы передачи и вещания экономически выгодными. Подсчитано, что при дальности связи примерно 1900 км стоимости спутниковых и наземных систем передачи равны, а при дальности свыше 3000–4000 км стоимость спутниковых систем оказывается в 2 раза меньше.

По охватываемой территории, размещению и принадлежности ЗС, структуре управления ССС можно подразделить:

- на *глобальные* (со всемирным охватом), такие как INMARSAT, INTELSAT;

- *региональные*, такие как Eutelsat, Arabsat;

- *зоновые*, все ЗС которых расположены в пределах одной из зон (районов) страны;

- *ведомственные* (деловые, корпоративные), ЗС которых принадлежат одному ведомству и передают только деловую информацию и данные в интересах ведомства.

Ретрансляция сигнала в спутниковых системах бывает *пассивной* и *активной*.

При *пассивной ретрансляции* бортовой ретранслятор представляет собой надувную металлизированную сферу, от которой сигнал наземной станции отражается и поступает к приемной антенне корреспондента. Отсутствие бортовой аппаратуры существенно уменьшает стоимость линии связи, однако к наземной станции приходит только слабый отраженный сигнал.

Опыт эксплуатации пассивных спутников-ретрансляторов выявил основные недостатки систем связи, в которых они используются, такие как:

- низкая эффективность вследствие слишком большого затухания сигнала;

- мощность передающих станций должна быть достаточно большой (до 10 МВт), а чувствительность приемных наземных устройств очень высокой;

- сложность и высокая стоимость приемопередающей аппаратуры и, следовательно, системы космической связи в целом;

- малая мощность отраженного сигнала приводит к низкому качеству связи из-за большого влияния шумов и помех;

- большая сложность создания системы с ограниченной зоной покрытия.

Все это заставило отказаться от создания систем регулярной связи на основе пассивных ретрансляторов.

При *активной ретрансляции* на борту спутника устанавливают приемопередающую ретрансляционную станцию, обеспечивающую требуемый уровень сигнала. При мощности бортового ретранслятора порядка 10 Вт

обеспечивается прием в полосе пропускания наземного приемника 20 МГц. Такая полоса достаточна для передачи сигналов многоканальной телефонии или телевидения. Таким образом, для магистральной телефонной связи и сети телевизионного вещания пригодны только активные спутники-ретрансляторы.

До начала 90-х гг. XX в. спутниковая связь строилась почти исключительно с использованием спутников-ретрансляторов на геостационарной или высокоэллиптических орбитах и стационарных земных станций с большими остронаправленными антеннами. Исключение составляли лишь некоторые специальные системы с использованием спутников на низких круговых орбитах и переносом небольших дискретных сообщений в запоминающее устройство бортовых ретрансляторов. И только в 90-х гг. XX в. появились десятки различных проектов ССС (часть из которых уже реализована), использующих *технологии VSAT* (very small aperture terminal), т. е. портативных абонентских станций с относительно небольшими антеннами, а также систем персональной подвижной связи.

VSAT-станция. VSAT-станция – станция спутниковой связи с антенной малого диаметра, порядка 1,8–2,4 м. VSAT-станция используется для обмена информацией между наземными пунктами, а также в системах сбора и распределения данных. ССС с сетью земных станций типа VSAT обеспечивают телефонную связь с цифровой передачей речи, а также передачу цифровой информации.

К станциям спутниковой связи типа VSAT относятся станции спутниковой связи, обладающие определенными характеристиками, описанными в Рекомендациях № 725–729 ММКР.

При передаче телефонного трафика спутниковые системы образуют групповые тракты (совокупность технических средств, обеспечивающих прохождение группового сигнала, т. е. несколько телефонных подканалов объединяются в один спутниковый) и каналы передачи (совокупность средств, обеспечивающих передачу сигналов от одной точки в другую). Каналы и групповые тракты ССС широко используются на участках магистральной и внутризоновой телефонных сетей, в ряде случаев на местных линиях связи ССС позволяют:

- организовать прямые закрепленные каналы и тракты между любыми пунктами связи в зоне обслуживания КА;
- работать в режиме незакрепленных каналов, при котором спутниковые каналы и тракты могут оперативно переключаться с одних направлений на другие при изменении потребностей трафика на сети, а также использоваться наиболее эффективно – полноступными пучками.

Привлекательной особенностью станций VSAT является возможность их размещения в непосредственной близости от пользователей, которые благодаря этому могут обходиться без наземных линий связи.

К основным характеристикам современных ССС относятся следующие:

- *Обслуживаемая территория.* По обслуживаемой территории спутниковые системы делятся на *глобальные*, обслуживающие всю земную поверхность, включая и акваторию Мирового океана, и *региональные (зональные)*, обслуживающие часть земной поверхности или отдельные ее части. Обслуживаемая территория определяется прежде всего видом космической группировки, высотой и наклоном орбит, количеством космических аппаратов в группировке и ее структурой, а также характеристикой применяемых бортовых антенн. Для региональной связи удобны также космические группировки на высокоэллиптических орбитах, однако и они в зависимости от вида имеют определенные ограничения. Для глобальной связи выгоднее всего применять космические группировки на средних или низких круговых орбитах, позволяющие при определенной структуре покрыть зонами радиовидимости КА всю земную поверхность.

- *Автономность системы.* Предпочтительны системы, не использующие для организации связи на обслуживаемых ими территориях других средств связи — наземных или спутниковых. Аренда внешних линий связи усложняет систему и удорожает эксплуатацию, а иногда и ухудшает качество связи.

- *Пропускная способность системы.* Чем выше пропускная способность системы, тем большее количество абонентов она в состоянии обслужить и больше доход от ее эксплуатации. Однако важна не только общая пропускная способность, но и возможность ее перераспределения внутри зоны радиовидимости КА, сосредоточения большей ее части в ограниченных регионах большим количеством пользователей (например, в крупных городах).

- *Скорости передачи информации.* Системы цифровой спутниковой связи разделяют на *низкоскоростные* и *высокоскоростные*. Низкоскоростные системы обычно используют скорости передачи информации от 1,2 до 9,6 кбит/с, а также 16, 32 и 64 кбит/с и предназначаются главным образом для телефонных переговоров, передачи факсов, телеграмм или других дискретных сообщений. Высокоскоростные системы обычно имеют скорость 114, 384, 1024, 2048 кбит/с и служат для организации видеоконференц-связи, обмена данными между компьютерными сетями, доступа в различные базы данных, Интернет и предоставления других услуг мультимедиа.

- *Связность системы.* В многоспутниковых системах связи охват всей обслуживаемой территории осуществляется совокупностью зон радиовидимости отдельных КА, входящих в космическую группировку, вследствие чего возникает задача их объединения в единое целое, т. е. обеспечения связности системы. Связность может достигаться либо с помощью

межспутниковых линий связи, соединяющих каждый спутник группировки с соседними, либо при помощи *наземных ретрансляторов*, расположенных в расчетных зонах земной поверхности, либо комбинацией этих двух способов.

- *Качество связи*. Этот важный критерий определяется рядом факторов: скоростью передачи информации, энергетикой каналов, количеством ретрансляций между КА (при организации «многоскачковых» трасс), включением в интегральный канал связи звеньев с различным качеством (например, некоторых видов проводных междугородных линий связи), условиями радиовидимости КА и др.

- *Принципы технического построения системы*. Все спутниковые системы включают космический и земной сегменты.

Важным для таких систем является *метод многостанционного доступа (МСД)* – метод совмещения сигналов, излучаемых различными ЗС, для их прохождения через общий ствол бортового ретранслятора КС. В принципе существует три основных метода организации такого доступа – *с разделением сигналов по частоте, форме и времени*.

1. *Многостанционный доступ с частотным разделением (МДЧР)*, используемый для смежных лучей (сот) – системы Iridium, Globalstar, «Сигнал» (в иностранной литературе: *FDMA – frequency division multiple access*).

Это наиболее традиционный, простой и понятный метод. Суть его заключается в том, что частотный диапазон разбивается на каналы, в итоге каждому пользователю выделяется узенькая полоска частот, вполне достаточная, по крайней мере для передачи голоса или данных. По этому принципу работает вся традиционная аналоговая радиосвязь, а также мобильные сети первого поколения, в частности NMT450 (бывшая сеть «Сотел»). При всей простоте у этого метода больше достоинств, чем недостатков – простая аппаратная реализация, чистый (при отсутствии сильных помех) звук, низкая стоимость оборудования. А недостаток собственно единственный, но весьма существенный – слишком маленькая емкость сети, т. е. при частотном разделении обслуживать значительное количество пользователей в узком частотном диапазоне невозможно.

2. *Многостанционный доступ с временным разделением (МДВР)*, используемый в отдельном луче (соте), – система Iridium (в иностранной литературе: *TDMA – time division multiple access*).

Разделение по времени – это когда несколько пользователей работают на одной и той же частоте, но каждому выделяется временной квант для передачи данных. Метод почти всегда совмещается с FDMA, т. е. изначально диапазон делят на каналы, а уж затем канал делится по времени между пользователями. Классический пример сети этого типа – GSM. Емкость такой сети существенно выше, чем FDMA, однако за это при-

ходится платить немалую цену. В первую очередь, ухудшается качество передаваемого звука — чтобы ужать произносимое за секунду и вместить это во временной квант в сотни раз меньше, приходится прибегать к компрессии. Следующая проблема — это необходимость сборки пакетов. Поскольку звук передается не единым непрерывным потоком, а цифровыми пакетами, необходимо перед передачей сигнала вызываемому абоненту правильно отсортировать пакеты и собрать из них нечто похожее на изначальный сигнал. А ведь пакеты в пути могут теряться или приходиться не в том порядке. Отсюда выпадение слогов и целых слов, эхо, а также жесткое технологическое ограничение на предельную дальность — в противном случае время прохождения сигнала в эфире оказывается слишком большим для того, чтобы пакеты могли быть выстроены в правильном порядке, и главное, при расстоянии превышающем некоторую критическую величину делается невозможным детектирование коллизий пакетов, т. е. нарушение правильной их передачи из-за попытки одновременного использования среды передачи данными различными пользователями.

3. *Многостанционный доступ с кодовым разделением (МДКР)*, используемый в каждом луче (соте), — системы Globalstar, «Сигнал» (в иностранной литературе: *CDMA — code division multiple access*).

Этот метод был разработан в 1995 г. компанией Qualcomm. Суть его заключается в том, что все пользователи используют единый частотный ресурс одновременно, без разделения по времени, но сигнал от каждого из них кодируется специальным кодом. Зная этот код, из какофонии эфира чипсет коммутатора может спокойно выделить весь набор полезных сигналов. Метод обеспечивает самую высокую из возможных емкость сети, одновременно сохраняя высочайшее качество передачи сигнала и максимально возможную скорость при передаче данных. Более того, технология позволяет принимать сигнал с мобильного терминала несколькими базовыми станциями одновременно, а затем, взаимодействуя между собой, отделить помехи и получить почти идеальное качество. А недостаток у этого метода лишь один — требуются значительные вычислительные ресурсы для дешифровки сигнала.

По *территориальному признаку* все ССС можно разделить на:

- *глобальные*, зона обслуживания которых охватывает весь земной шар; *национальные*, обеспечивающие связь в отдельной стране или в группе близко расположенных стран;

- *региональные*, обеспечивающие связь в отдельных регионах.

По *орбитальному признаку* спутниковые системы разделяются:

- на системы *GEO* (геостационарные);
- *LEO* (низкая орбита — примерно до 1500–2000 км);
- *MEO* (средневысотная орбита — 5000–20 000 км);
- *HEO* (системы связи на эллиптических орбитах).

2.2. Геостационарные спутниковые системы связи

Геостационарные орбиты — это орбиты, расположенные на высоте примерно 36 000 км, причем скорость вращения КА обеспечивают равной скорости вращения Земли. Тем самым достигают эффекта «неподвижности» КА относительно точки наблюдения, расположенной на Земле.

Если ширину диаграммы направленности антенных систем КА выбрать равной $17,3^\circ$, то трех спутников достаточно для полного покрытия территории Земли, как это показано на рис. 4.

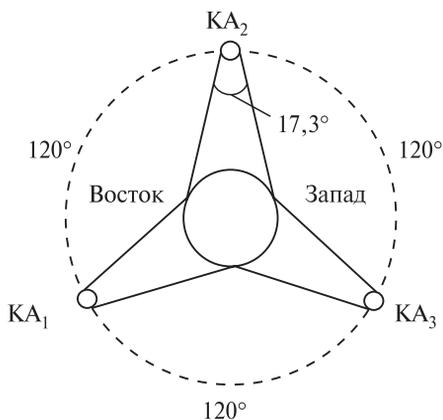


Рис. 4. Глобальное покрытие с помощью трех гео­стационарных ССС

Ориентация КА на рис. 4 выбрана таковой, что КА₁ располагается в зоне Индийского океана, КА₂ — в зоне Тихого океана, а КА₃ — в зоне Атлантического океана.

Гео­стационарная ор­бита может быть эк­ваториальной, т. е. ее угол скло­нения совпадает с плоскостью эк­ватора, либо на­клонной.

В настоящее время наиболее крупные западные компании спутниковой связи — Inmarsat, Intelsat, Eutelsat. Это международные консорциумы, принадлежащие входящим в них странам. Как правило, сигнал, поступающий через их спутники, превосходит по качеству получаемый с российских, поэтому их услугами пользуются операторы телефонных сетей общего пользования.

Inmarsat специализируется на обеспечении спутниковой связи с подвижными объектами и изначально разрабатывалась для использо-

вания с самолетов и морского транспорта. Каждый спутник покрывает приблизительно третью часть Земли и стратегически расположен над одним из четырех океанов для обеспечения «глобальной всемирной паутины в небе». Для совершения звонка спутниковый телефон системы INMARSAT настраивается на один из спутников. Наземные станции связи с гигантскими антеннами принимают сигнал со спутника и маршрутизируют его до конечного абонента в любой стране мира. Если же кто-либо звонит на спутниковый телефон, то все происходит точно так же, но в обратной последовательности.

Системы на основе геостационарных спутников GEO из-за постоянства их расположения над определенной точкой поверхности Земли обладают рядом *преимуществ* при организации глобальной связи.

Достоинства геостационарных ССС:

- охват всей территории земной поверхности (95 %) минимальным числом спутников (минимум 3, но на практике используют большее число для увеличения вероятности надежной работы);

- отсутствие перерывов связи из-за взаимного перемещения КА и пользовательского терминала во время сеанса связи;

- практическое отсутствие доплеровского сдвига частоты, обусловленного взаимным перемещением КА и Земли;

- отсутствие необходимости в организации межспутниковой связи (в отличие, например, от низкоорбитальных систем);

- отработанная технология управления КА;

- сравнительно низкие энергетические затраты на коррекцию траектории движения КА и его удержание на орбите в заданной точке орбиты.

Следует отметить, что, находясь на геостационарной орбите, КА, как и любые другие орбитальные КА, испытывает воздействие гравитационных полей Луны и Солнца, причем влияние Луны больше примерно в три раза. Эти поля вызывают суточные колебания радиуса орбиты, приводящие к накоплению наклона плоскости орбиты примерно на величину $0,85^\circ/\text{год}$. За 26,6 года угол склонения орбиты без коррекции может измениться от 0° до $14,67^\circ$, причем в последующие 26,6 года угол склонения орбиты опять уменьшится до 0° .

Недостатки геостационарных ССС:

- *большой уровень задержки сигналов* (до 600 мс), связанный с конечным временем распространения радиоволн. Наличие задержек может служить препятствием к использованию телефонной связи, так как вследствие этого *невозможно взаимодействие с другими сетями передачи данных*. Действительно, поскольку геостационарная орбита находится на расстоянии около 36 тыс. км от поверхности Земли, то задержка из-за конечности скорости распространения радиосигнала составляет око-

ло 260 мс, если сигнал один раз проходит путь до спутника-ретранслятора и обратно ($2 * 260 = 520$ мс). Остальные перечисленные источники задержки не играют большой роли. При передаче данных задержка совершенно незаметна и может проявляться только в некотором снижении скорости обмена. Для устранения этого недостатка применяют специальные протоколы. Что же касается телефонной связи, то задержка сигнала чувствуется очень сильно и при высоких требованиях к каналу связи может быть неприемлема;

- *размеры бортовой антенны КА*, необходимые для формирования узкой диаграммы направленности, должны быть большими, но в пределах возможностей современных технологий. Разворачивание и геостабилизация такой сложной антенны в космосе связаны с большим техническим риском, что является определяющим фактором при оценке экономической эффективности разрабатываемых проектов;

- геостационарные КА не позволяют обеспечить связь в широкоширотных районах и для их охвата требуются эллиптические орбиты с апогеем в Северном полушарии (~ 40 тыс. км) и перигеем в Южном полушарии (~ 400–600 км), а наклонение плоскости орбиты должно составлять примерно $63,4^\circ$ (например, для ССС «Молния»);

- необходимость достаточно высокой энергии, что затрудняет персональную связь;

- следует отметить и тот факт, что на геостационарной орбите в настоящее время уже расположено большое количество КА, и размещение новых в заданных точках стояния с требуемой электромагнитной совместимостью представляет серьезную трудность.

2.3. Средневысотные спутниковые системы связи

Средневысотные ССС являются промежуточным звеном между геостационарными и низкоорбитальными. КА средневысотных ССС располагаются в основном на круговых орбитах, находящихся на высотах от 5000 до 15 000 км. Для полного покрытия территории Земли требуется 7–12 КА. Упрощенная схема организации охвата территории Земли в средневысотных и низкоорбитальных ССС изображена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, в ССС осуществляется многократная ретрансляция сигналов земных станций через (с помощью) КА, а сами космические аппараты должны иметь возможность одновременно работать с несколькими земными станциями. КА при этом представляет собой ретранслятор, имеющий, как правило, несколько стволов.

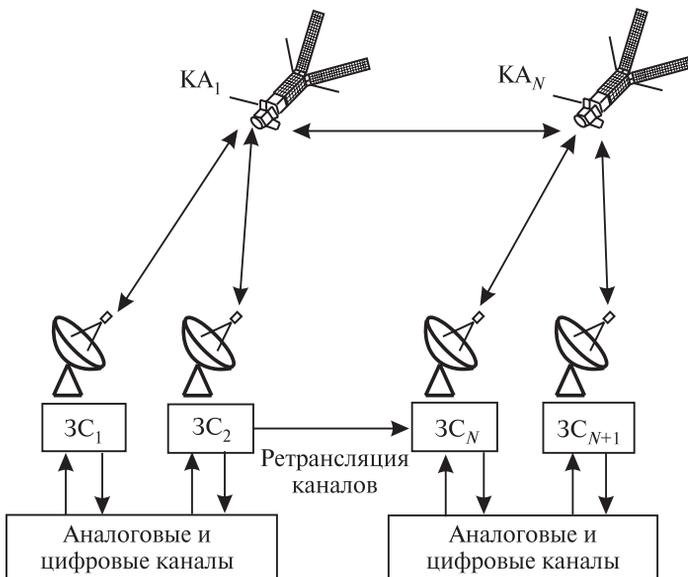


Рис. 5. Упрощенная схема организации средневысотных и низкоорбитальных ССС

Достоинства средневысотных ССС:

- более высокие характеристики обслуживания за счет увеличения рабочих углов места и числа КА, находящихся одновременно в поле зрения наземного абонента;
- сравнительно невысокие значения задержки сигналов (не выше 130 мс) при проведении сеансов связи;
- улучшенные энергетические показатели ССС в целом и возможность обеспечения персональной связи непосредственно с КА при относительно небольших энергетических затратах.

Недостатки средневысотных ССС:

- подверженность влиянию пространственных поясов заряженных частиц (пояса Ван Аллена), ухудшающих, а в некоторых случаях и препятствующих организации устойчивой связи. Первый радиационный пояс расположен на высоте 2000–9000 км до 30° в обе стороны от экватора. Второй – на высоте 13 000–19 000 км до 50° в обе стороны от экватора;
- более низкая, чем у геостационарных ССС продолжительность пребывания в зоне радиовидимости земных станций (1,5–2 ч).

2.4. Низкоорбитальные спутниковые системы связи

К низкоорбитальным спутниковым системам (системы LEO) относят такие, для которых высота орбиты находится в пределах 700–1500 км, масса КА – до 500 кг, орбитальная группировка – от единиц до десятков спутников. Для охвата связью большой территории Земли используют несколько плоскостей орбит. Более короткие линии спутниковой связи «вверх» и «вниз» через низкие орбиты в сравнении с геостационарными обеспечивают *меньшее ослабление сигнала и время запаздывания* сигнала. Кроме того, они позволяют *охватить приполярные районы* (с полярных орбит). В *низкоорбитальных ССС* в зависимости от наклона плоскости орбиты относительно экватора различают низкие экваториальные ($\alpha = 0^\circ$), полярные ($\alpha = 90^\circ$) и наклонные ($\alpha \neq 0^\circ$) орбиты.

Каждый из спутников группировки имеет ограниченную зону обслуживания, и для глобального охвата *необходима связь между ними*. Она обеспечивается разными способами в разных проектах. В одних (Iridium) – *с помощью линий радиосвязи в космосе*, в других (Globalstar) обеспечена незаметная для пользователя *непрерывная автоматизированная передача абонента от луча к лучу* и от ИСЗ к СЗ при достаточно большом числе наземных станций.

В числе факторов, способствующих развитию систем LEO, нельзя не учитывать *биологический*. Так, для реализации требований биологической защиты человеческого организма от СВЧ-излучения рекомендуемый уровень непрерывно излучаемой мощности радиотелефона составляет *не более 50 мВт*. Эффективный прием сигнала такой мощности геостационарным спутником сопряжен со значительным усложнением последнего: *созданием крупноразмерных антенн и точного удержания узких лучей диаграммы направленности* в заданных регионах земной поверхности. Для низкоорбитальных спутниковых систем длина радиолиний во много раз меньше и проблема создания многолучевых антенн менее остра.

Повышенный интерес к низкоорбитальным системам объясняется *возможностью предоставления услуг персональной связи*, включая радиотелефонный обмен и связь с подвижными объектами с использованием сравнительно малогабаритных абонентских терминалов. Стоимость услуг подвижной связи с помощью систем LEO оказывается в несколько раз ниже аналогичных услуг, предоставляемых геостационарными системами, благодаря использованию недорогих абонентских станций и менее дорогого космического сегмента.

Низкоорбитальные системы позволяют обеспечить бесперебойную связь с терминалами, размещенными в любой точке Земли, и практиче-

ски не имеют альтернативы при организации связи в регионах со слаборазвитой инфраструктурой связи и низкой плотностью населения.

Достоинства низкоорбитальных ССС:

- значительно лучшие энергетические показатели в сравнении с GEO и МЕО;
- возможность организации персональной связи при минимальных энергетических затратах потребителя.

Недостатки:

- малая продолжительность сеанса связи с одним КА;
- меньшее время активного существования в сравнении с остальными системами. Это вызвано, во-первых, тем, что большая часть времени (до 30 %) КА находится на теневой стороне Земли, а, во-вторых, влиянием радиационного пояса. Преимущество средневысотной орбиты в сравнении с низкой состоит в том, что первая лежит между радиационными поясами Земли, в то время как вторая – внутри первого пояса. Поэтому срок службы для систем МЕО – 15 лет, для LEO – 5–7 лет, что существенно влияет на их стоимость.

- большая подверженность к деградации орбит, связанной с влиянием атмосферы (повышенная плотность), что приводит к колебаниям эксцентриситета;

- низкая мгновенная зона обслуживания одним КА и соответственно необходимость в большом количестве спутников в группировке.

Персональная подвижная спутниковая связь. Потребности современного общества в обмене различного рода информацией стимулируют быстрое развитие систем спутниковой связи. Однако традиционные высокоорбитальные спутниковые системы связи (космические аппараты находятся на геостационарных и высокоэллиптических орбитах) требуют использования относительно громоздкого и дорогостоящего оборудования наземных станций, которые часто недоступны массовому пользователю. Поэтому одновременно с созданием таких систем идет проектирование и активное строительство глобальных систем *персональной подвижной спутниковой связи со спутниками на низких орбитах*.

Основное отличие систем *персональной ПСС* от традиционных систем ПСС – уменьшение массы и габаритов абонентских терминалов и доведение их до размеров телефонной трубки (*hand-set*). Кроме того, эти терминалы обеспечивают дополнительный сервис пользователям: соединение с сотовым приемопередатчиком и выход в любую сотовую сеть, присоединение к факсимильному аппарату, внешнему громкоговорителю, отдельному микрофону, компьютеру, терминалу данных, модулю GPS. Предполагают они и рядом других специальных возможностей.

В начале 90 гг. XX в. на рынке телекоммуникаций появились проекты низкоорбитальных спутниковых систем, которые в первую очередь отличаются «миниатюрными» летательными аппаратами. По сравнению с геостационарными низкоорбитальные спутники (прежде всего, за счет значительно меньшего, чем у геостационарных спутников, расстояния до поверхности Земли) позволяют поддерживать связь с наземной аппаратурой малой мощности, в том числе с портативными абонентскими терминалами, подобными сотовому телефону.

Низкоорбитальные спутниковые системы глобальной связи можно разделить на *два типа*, отличающихся набором предоставляемых услуг и сложностью технической реализации:

- *системы пакетной передачи данных;*

- *системы радиотелефонной связи*, предоставляющие, кроме услуг систем первого типа, возможность обмена речевой информацией в телефонном режиме.

Системы пакетной передачи данных предназначены, как правило, для передачи любых данных в цифровом виде с небольшими скоростями — от нескольких сотен бод до нескольких десятков кбод. Во многих случаях при применении этих систем можно отказаться от непрерывности обслуживания и не предъявлять жестких требований по оперативности доставки сообщений. Тогда низкоорбитальную систему пакетной передачи данных можно строить исходя из следующих *основных принципов*:

- допускается использовать ИСЗ с отсутствием коррекции положения на орбите, что позволяет отказаться от двигательных установок на ИСЗ и применять простейшую гравитационную систему ориентации;

- использовать УКВ-диапазоны частот 130–400 МГц, что позволяет применить на ИСЗ и в наземных станциях слабонаправленные антенны с коэффициентом усиления 0–3 дБ и передатчиком с небольшой мощностью 2–10 Вт.

Эти принципы позволяют создавать недорогие многоспутниковые системы пакетной передачи данных с ориентировочной стоимостью 50–200 млн долл. в зависимости от числа ИСЗ и вида предоставляемых услуг. Такие системы должны появиться в самое ближайшее время. К ним относятся системы Orbcom, Starsys, Leosat, Leocom-Spas, «Гонец», «СПС-спутник» и др.

Назначение низкоорбитальных систем радиотелефонной связи — передача речевых сообщений с использованием персональных радиотелефонов. При этом обслуживание абонентов должно быть непрерывным и в реальном масштабе времени. Это обуславливает следующие *принципы построения радиотелефонной системы*:

- необходимо использовать стабилизированные на орбите ИСЗ с трехосной системой ориентации и двигательными установками. Количество спутников в системе должно быть большим и обеспечивать непрерывное покрытие зоны обслуживания;

- для обеспечения экономической эффективности системы число радиотелефонных каналов на один ИСЗ должно быть большим. Это потребует широких полос частот, даже с учетом их многократного использования. Поэтому необходимо использовать более высокие диапазоны частот, выделенные для подвижной спутниковой связи (более 1,5 ГГц);

- обеспечение непрерывности связи, особенно при использовании на ИСЗ многолучевых антенных систем, потребует большого количества региональных станций с дорогим коммутационным оборудованием.

Все вышесказанное подтверждает, что для создания низкоорбитальных систем радиотелефонной связи требуются значительно большие капиталовложения, чем для создания систем пакетной передачи данных.

К системам персональной спутниковой радиотелефонной связи относятся Iridium, Globalstar, «Гонец-Р», «Сигнал», «Курьер», «Коскон» и др. Спектр услуг, предоставляемых операторами этих систем, примерно одинаков. Он определяется набором конечных устройств пользователя (телефон, факс, пейджер), но может дополняться роумингом, а также возможностями определения местоположения абонента.

Сравнительные показатели геостационарных, среднеорбитальных и низкоорбитальных систем, характеризующие орбитальные различия, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные показатели геостационарных, среднеорбитальных и низкоорбитальных систем

Характеристики	Тип орбиты		
	GEO	MEO	LEO
Высота орбиты, км	36 000	5000–20 000	700–1500
Количество КА в группировке при непрерывном охвате территории, шт.	3	8–2	48–72
Площадь зоны покрытия одним КА относительно поверхности Земли (угол места – 5°), %	34	25–28	3–7
Время пребывания КА в зоне радиовидимости, ч	непрерывное	1,5–2	0,15–0,25
Задержка при передаче сигналов, мс:			
– региональная связь	не менее	80–130	20–70
– глобальная связь	500	250–400	170–300

Окончание табл. 2

Характеристики	Тип орбиты		
	GEO	MEO	LEO
Максимальный относительный доплеровский сдвиг	$\pm 10^{-8}$	$\pm 6 \cdot 10^{-8}$	$\pm (1,8-2,4) \cdot 10^{-5}$
Угол места на краю зоны обслуживания, град	5°	25–30°	10–15°
Время переключения из одного луча в другой, мин	10–15	5–6	1,5–2

В табл. 3 приведена сравнительная характеристика наиболее распространенных ССС.

Таблица 3

Сравнительные характеристики ССС

Описание	Inmarsat	Iridium	Globalstar	New ICO
Орбита	GEO	LEO	LEO	MEO
Высота орбиты	36,500	780	1,414	10,000
Количество спутников	4F2 + 4F3	66	48	12–20
Число орбит		6	8	2
Тип и наклон орбиты	Круговая	Круговая квазиполяр.	Круговая квазиполяр.	Круговая
Глобальное покрытие	+	+	+(запланировано)	+(запланировано)
Начало эксплуатации	1982	1998	2000	2003
Голос (кбит/с)	4,8	4,8	4,8	4,8
Факс (кбит/с)	2,4–64	–	2,4	2,4
Данные (кбит/с)	0,6–64	2,4	9,6	9,6
ISDN	+	–	–	Н/9
Пакетная передача	+	–	–	Н/9
Короткие сообщения	–	+	+	+
Пейджинг	–	+	–	Нет
Размер портативной станции	ноутбук	трубка	труба	трубка
Вес портативной станции, кг	2,2	0,375	0,35	0,3–10,2
Цена, долл.	>3000	>1500	>1000	>1000
Стоимость минуты, долл.	0,19–7,5	0,85–1,80	1,8–4,0	1,0–3,0

3. СОСТАВ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И СРЕДСТВ ВЫВОДА НА ОРБИТУ

3.1. Наземный сегмент

Наземный сегмент включает в себя:

- приемо-передающие земные станции;
- контрольные ЗС;
- ЗС системы управления КА;
- центр управления системой связи;
- каналы управления системой;
- наземные станции.

Центры управления связи являются наиболее крупными образованиями, и в их состав входят несколько типов земных станций, осуществляющих функции управления системой связи в целом, контроля функционирования КА, входящих в орбитальную группировку, а также координации функционирования различных систем связи. Чаще всего ЦУС территориально объединены с центром управления полетом (ЦУП).

Задача ЗС (иногда их называют базовыми или узловыми станциями), помимо функций приема и передачи информационных потоков, — управление сетью связи на региональном уровне. Базовые и узловые станции образуют земную сеть системы связи. Через эти станции осуществляется выход абонентов (пользователей) системы в телефонные сети общего пользования ТФОП или цифровые сети интегрального обслуживания ТФОП.

Основные показатели ЗС:

● *диапазоны частот* на прием и передачу сигналов, на которые рассчитано оборудование станции — антенна, приемная и передающая аппаратура;

● *добротность станции на прием* G/T — отношение усиления антенны G (дБ) на частоте приема к суммарной шумовой температуре T станции (град. К) составляет 42 дБ/К для самых больших применяемых на практике антенн (диаметром 32 м) и 20–31,7 дБ/К для ЗС большинства региональных систем;

● *эффективная изотропно-излучаемая мощность* (ЭИИМ) — произведение мощности передатчика на усиление антенны (в полосе передачи) относительно изотропной антенны; обычно находится в пределах

50–95 дБ · Вт. Для упрощенного расчета помех, создаваемых другим сетям связи, часто указывают максимальную спектральную плотность мощности излучаемых земной станцией сигналов, хотя для точного расчета перекрестных помех необходимо знать структуры применяемых в системе сигналов (вид и параметры модуляции и т. п.);

- *диаметр антенны* оказывает решающее влияние на размеры и стоимость ЗС; он определяет добротность и ЭИИМ станции, а также ее пространственную избирательность. На земных станциях систем дуплексной связи применяют антенны диаметром от 1,5–2,5 до 12 м, иногда до 32 м, на ЗС приема циркулярной информации – от 0,45 до 2,5–4 м.

Структура российской низкоорбитальной системы «Сигнал», предназначенной для обслуживания абонентов на территории Европы и континентальной части Азии, изображена в качестве примера на рис. 6.

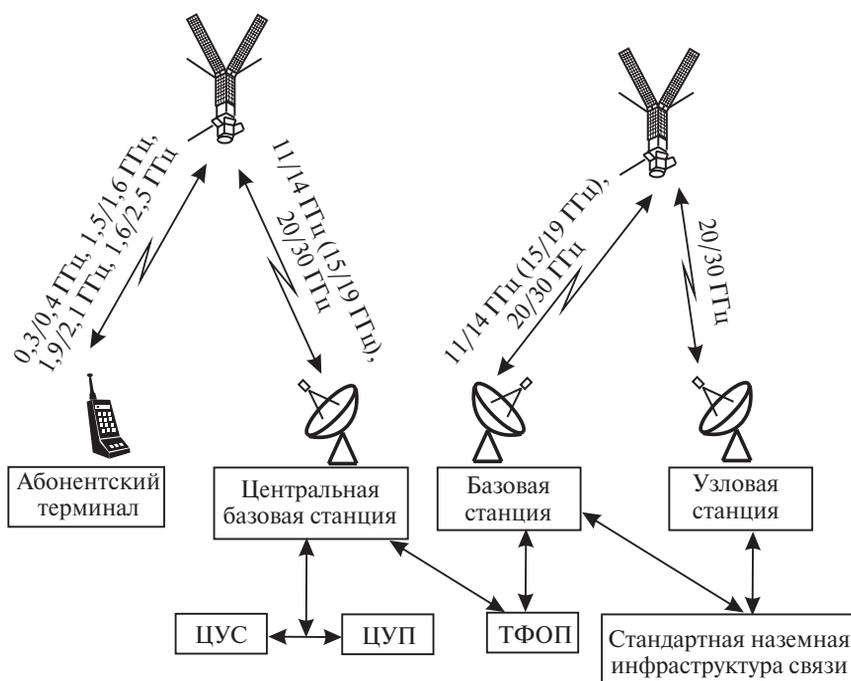


Рис. 6. Структура российской низкоорбитальной системы «Сигнал»

Система «Сигнал» не имеет межспутниковых фидерных каналов связи, которыми могут располагать другие системы. Связь между любыми абонентскими станциями происходит через КА и земные базовые стан-

ции. Для связи между базовыми станциями и КА предусмотрены специальные магистральные стволы в диапазонах 11/14 (15/19) ГГц и 20/30 ГГц.

В последние годы земные станции чаще называют *станциями сопряжения*, а в зарубежной литературе используют термин «gateway» (ворота, шлюз), поскольку через них осуществляется подсоединение абонентов к каналам других систем. При этом станция сопряжения выполняет аппаратную и программную поддержку протоколов этих систем, являясь своеобразным «шлюзом», в котором происходит промежуточное хранение сообщения. Количество этих станций зависит от способа организации связи в глобальном масштабе. В низкоорбитальных системах, в которых применяют межспутниковые линии связи, их количество составляет от 20 до 25. При отсутствии таковых для глобальных систем их количество возрастает до 150–210.

3.2. Космический сегмент

Космический сегмент состоит из группировки КА, выводимых на орбиту. Конфигурация орбитальной группировки зависит от назначения системы, требуемой зоны обслуживания и может быть управляемой.

В состав КА входят радиоэлектронное оборудование, центральный процессор, система ориентации и стабилизации, двигательная установка и система электропитания (СЭП), состоящая из набора солнечных батарей. Кроме того, на КА устанавливают различного типа антенные устройства, работающие как на прием, так и на передачу. Некоторые из этих антенн могут быть многолучевыми, каждый луч которых высвечивает на поверхности Земли определенную зону обслуживания. Так, например, КА системы связи Iridium содержат три группы антенн – шесть фазированных решеток для формирования 48 парциальных лучей в диапазоне 1616–1626 МГц, четыре антенны для организации так называемых фидерных линий связи со станциями сопряжения в диапазонах 19,4–19,6; 29,1–29,3 ГГц, четыре волноводно-щелевые антенны для фидерной межспутниковой связи в диапазоне 23,18–23,38 ГГц.

Основные показатели КС. Космическая станция характеризуется в основном теми же показателями, что и ЗС: *рабочим диапазоном частот, добротностью, ЭИИМ* каждого передатчика, *поляризацией* излучаемых и принимаемых сигналов. Однако значения ряда параметров существенно отличны от указанных для ЗС. Например, добротность приемного тракта КС обычно значительно ниже, что вызвано не только меньшими размерами антенны, но и применением более простого и обладающего большей шумовой температурой входного малошумящего усилителя.

Важной характеристикой бортового ретранслятора КС является число стволов. *Стволом ретранслятора*, или *стволом спутниковой связи*, называется приемо-передающий тракт, в котором радиосигналы проходят через общие усилительные элементы (общий передатчик) в некоторой выделенной стволу общей полосе частот. Весь диапазон частот, в котором работает спутник связи, принято делить на полосы (шириной 27–36, 72–120 МГц), в которых усиление сигналов осуществляется отдельным трактом – стволом. Несколько стволов могут иметь общие элементы: антенну, полноводный тракт, малошумящий входной *усилитель*. Вместо термина «ствол» часто применяется английский термин «транспондер».

Число стволов, одновременно действующих на КА, может составлять от 6–12 до 24–48. Сигналы этих стволов разделяются по частоте, пространству, поляризации. Числом стволов, их полосой пропускания и ЭИИМ определяется в *основном* важнейший суммарный показатель КА – его *пропускная способность*, т. е. число телефонных и телевизионных каналов (либо, в более общем виде, число двоичных единиц в секунду), которое можно передать через данный КА. Для уменьшения взаимных помех передача сигнала со спутника (Downlink) ведется на частоте, отличной от частоты передачи сигнала с Земли на спутник (Uplink). Поэтому ретрансляторы спутника имеют в своем составе преобразователи частоты. Обычно частота Downlink ниже, чем линии Uplink.

В зависимости от ширины диаграммы направленности бортовых антенн КА характеризуется *зоной покрытия* – частью поверхности земного шара, в пределах которой обеспечивается уровень сигналов от КА, необходимый для их приема с заданным качеством на ЗС определенной добротности. При этом гарантируется способность принять на входе КА сигналы от ЗС, обладающих определенной ЭИИМ.

Зона покрытия определяется шириной диаграммы направленности антенны КА и рассчитывается как пересечение поверхности Земли конусом луча антенны. Форма этого сечения зависит от точки *стояния* КА на орбите, точки *прицеливания* – точки пересечения оси главного лепестка антенны КА с земной поверхностью, а также от *нестабильности положения КА и ориентации его антенн*. В связи с нестабильностью положения КА вводится понятие *гарантированной зоны обслуживания*, в которой обеспечивается сохранение указанных ранее условий приема и передачи информации при любых сочетаниях отклонений КА и его антенны от среднего положения.

Важнейшим показателем КА, определяющим не только надежность и бесперебойность связи, но прежде всего экономические характеристики всей системы связи, является *срок службы КА* – время наработки спутника до отказа целиком либо до отказа допустимого количества стволов КА,

определяемое с высокой вероятностью – обычно 0,9 и более. Благодаря высокой надежности элементов, гибкой и разветвленной схеме резервирования срок службы современных КА достиг 10–12 лет и более.

Для систем спутниковой связи выделены определенные диапазоны частот, каждый из которых имеет свои особенности. Количество, размеры и формы зон обслуживания определяются конструкцией антенн.

Космическая платформа предназначена для поддержания работы спутника связи. Основными функциями космической платформы являются обеспечение бортового ретранслятора электропитанием и удержание спутника на заданной орбите. Электропитание бортовой аппаратуры осуществляется обычно от солнечных батарей и резервных аккумуляторов.

Под влиянием гравитационных сил спутник отклоняется от заданной орбиты, из-за чего необходимо периодически проводить ее коррекцию, используя специальные реактивные двигатели, установленные на спутнике. Поэтому значительную долю веса геостационарных спутников составляет вес двигательной установки и горючего для корректирующих двигателей. Запас горючего для коррекции орбиты, наряду с надежностью и долговечностью бортовой аппаратуры, определяет срок активного существования спутников связи.

Оперативное управление бортовыми системами и их контроль осуществляется бортовой вычислительной машиной. Кроме того, вся телеметрическая информация о состоянии систем спутника передается на землю. Наземный комплекс управления (НКУ) по результатам телеметрического контроля и измерения параметров орбиты спутника передает на него команды по коррекции орбиты и управлению бортовой аппаратурой. Сравнительные характеристики КА систем мобильной и персональной спутниковой связи приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные характеристики КА систем мобильной и персональной спутниковой связи

Название системы	Тип базовой платформы	Масса КА (на орбите), кг	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Средства вывода КА на орбиту
Геостационарные и высокоэллиптические КА систем мобильной и персональной спутниковой связи					
AceS	A2100	4400 (стартовая)	4000	12	«Протон»
AMSC	HS601	1500	3600	12	Atlas 2A
Artemis	DRS	2600 (стартовая)	2800	12	H2A
Eutelsat II	Eurostar 2000	900	3000	9	Ariane 44 L

Продолжение табл. 4

Название системы	Тип базовой платформы	Масса КА (на орбите), кг	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Средства вывода КА на орбиту
Inmarsat 2 Inmarsat 3	Eurostar 2000	860 1200	1200– 1670	10–13	Delta 2, Ariane, Atlas 2A
Italsat F2	–	1983 (стартовая)	1450	8	
MSAT	HS601	1650	3300	12	Atlas 2A
Геостационарные и высокоэллиптические КА систем мобильной и персональной спутниковой связи					
Optus	HS601	1650	3000	13	Long March CZ-2E
Solidaridad	HS-601	1672	3150	12–14	Ariane 44 LP
Spaceway	HS-702	4000 (стартовая)	н/д	15	н/д
«Банкир»	«Купон»	2200	1200	10	«Протон»
«Горизонт»	н/д	2100 (стартовая)	1300	3–5	«Протон»
«Марафон»	«Аркос», «Маяк»	2400 2700	н/д	8–10 5–7	«Протон»
«Полярная звезда»	«Ямал- 200»	2100	2500	10	«Протон»
Низкоорбитальные и средневысотные КА систем радиотелефонной и широкополосной связи					
Celestri	Matra Marconi	3100 (стартовая) 2500	13 600 (пик) 4600 (сред)	8	н/д
Ellipse	–	730/680	1780/1880	5	н/д
Globalstar	–	450	1100	7,5	Delta 2, «Зенит-2»
ICO	HS-601	2750	8700	12	Delta 2, Ariane 4
Iridium	Lockheed	690	1400	5	Delta 2, «Протон», Long March 2C
Odyssey	–	2500	4600	15	Atlas 2A
Skybridge	–	800	3000	8	Ariane 4, Ariane 5
Teledesic	–	795	11 600	10	Delta 3
«Сигнал»	–	310	100	6	«Циклон»

Окончание табл. 4

Название системы	Тип базовой платформы	Масса КА (на орбите), кг	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Средства вывода КА на орбиту
Низкоорбитальные системы передачи коротких пакетов данных					
«Гонец»	—	250	500	7	«Рокот»
Orbcomm	Microstar	43	160	4	Pegasus XL
Faisat	—	89,5	60	5–7	«Космос-3»

В последнее время запуск КА на орбиту проводят с помощью специальных универсальных космических платформ, что позволяет не только сократить сроки и стоимость разработки и одновременный запуск нескольких КА, но и использовать при их создании перспективные и хорошо отработанные технологии. В настоящее время существует широкий выбор космических платформ, удовлетворяющих требованиям различных полезных нагрузок по массогабаритным показателям, энергоресурсу, условиям космической эксплуатации, надежности и стоимости. Данные о космических платформах приведены в табл. 5.

Таблица 5

Данные о космических платформах КА СССР

Тип платформы	Масса, кг	Габаритные размеры КА, м	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Цена, млн долл.
A2100	450 (полезная)	$L = 1,82,$ $h = 1,27-2,1$	4000	15	150
Amos	961 (110 полезная)	2,5*1,5*1,5	8 стволов по 20–40	10	140
FS-1300	3625 (стартовая) 2200 (на орбите)	н/д	3900	15	80–100
F-Sat	1134–2948 (полезная)	46,4 м ² (панель)	2400	7	30
HS-376	650 (на орбите)	$L = 2,16,$ $h = 2,74$	1000	10	60
HS-601	2500 (стартовая) 680 (полезная)	20 м (панель)	3000	10	90–100
HS-702	910 (полезная)		11 000		90–100
LM700	227	1,65*0,66*0,46	5000	7	5

Тип платформ	Масса, кг	Габаритные размеры КА, м	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Цена, млн долл.
Satcom 4000	1820 (стартовая) 1050 (полезная)	1,7*2,1*1,5 19,3 м (панель)	н/д	н/д	н/д
Satcom 5000	2580 (стартовая) 1540 (полезная)	2,8*2,2*2,35 24,3 (панель)	н/д	н/д	н/д
Spacebus 2000	1850(Ariane) 942 (р/топливо)	22,4 (панель)	3000	7	58
Spacebus 300	2400 (Ariane) 1000 (на орбите)	н/д	3240	8–9	100
Spacebus 3000	2415 (стартовая) 260 (полезная) 1546 (р/топливо)	н/д	5000	12	100–200
«Ямал-200»	1300–1600 300 (полезная)	н/д	5100	12–15	н/д
«Ямал-300»	2500–2 700 600 (полезная)	н/д	8500–10 000	12–15	н/д

3.3. Сегмент средств вывода спутников на орбиту

Сегмент средств вывода спутников на орбиту содержит стартовые комплексы, ракетносители с космическими платформами, центры управления полетом КА. Как правило, эти комплексы и средства используют не только для развертывания и эксплуатации ССС, но и для других систем гражданского и военного назначения.

Современные ракетно-космические комплексы предназначены для создания и восполнения орбитальных группировок, включая предстартовую подготовку, выведение КА на орбиту и разведение спутников по орбите в случае группового запуска.

В многоспутниковых системах вывод КА на орбиту осуществляется с использованием групповых запусков (от 3 до 12 КА за пуск) с помощью одной ракеты-носителя. Такой групповой запуск КА является наиболее эффективным, поскольку требует меньших затрат на создание орбитальной группировки и снижает загрузку стартового комплекса, а также целесообразен в связи с ужесточением требований к уменьшению числа пусков ракет-носителей по экологическим соображениям.

Современные космические платформы совместимы с большинством ракет-носителей среднего и тяжелого класса, такими как Delta, Atlas, Ariane 4, Ariane 5, «Протон», «Зенит», Pegasus XL, Long March и Н-2. В качестве средств восполнения орбитальной группировки используются легкие ракеты-носители, рассчитанные на запуск одного или двух спутников («Космос», Conestoga, Taurus).

Легкие низкоорбитальные КА могут быть запущены с традиционных и с мобильных пусковых установок, включая морской запуск, например с помощью ракетносителя «Зенит». Запуск легких КА может быть осуществлен за короткий срок (менее 48 часов) и не требует привлечения дорогостоящего обслуживающего персонала. Такой вид спутников особенно выгоден для стран, не имеющих собственных космодромов. По некоторым оценкам в ближайшее время для вывода на орбиту малых КА будет приходиться около 15 % средств запуска.

Данные об основных ракетносителях, используемых для вывода КА спутниковых систем связи, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Основные ракетносители, используемые для вывода КА ССС

Тип ракеты-носителя	Разработчик-изготовитель	Надежность, %	Стоимость запуска, млн долл.
«Протон»	ГКНПЦ им. Хруничева, Москва	95,6 (более 200 пусков)	65 (Байконур)
«Зенит»	НПО «Южное», Днепропетровск	около 93 (35 пусков)	65 (Байконур)
Delta 2	McDonnell Douglas	98 (245 пусков)	50
Ariane 40 Ariane 44L	ESA	96	65–115
Ariane 5	Aerospatiale	нет данных	105 (первые пуски–200 млн долл.)
Atlas 2, Atlas 2A, Atlas 2AS	Lockheed Martin, США	91,8	75 85 115
LLV	Lockheed Martin, США	нет данных	16(LLV1), 22(LLV2), 25–30 (LLV3)
Long March CZ-2 Long March CZ-3	Great Wall Industry Corp., Китай	менее 90	20 (CZ-2C), 40 (CZ-2E), 33 (CZ-3), 45 (CZ-3AD), 70 (CZ-3B)
Pegasus XL	Orbital Sciences Corp.	менее 70	13
«Космос»	ПО «Полет», Омск	97	8

Пользовательский сегмент включает в себя все виды стационарных и подвижных объектов наземного, морского и воздушного базирования, включая персональных пользователей. Абонентские станции (*терминалы*) могут быть стационарными, передвижными, и их конструктивные особенности зависят от условий эксплуатации. Персональные терминалы современных ССС мало чем отличаются от существующих моделей сотовых телефонов и могут быть двух типов — однорежимные, работающие только в сети данной ССС, и двухрежимные, рассчитанные на обслуживание абонентов как в сети данной спутниковой системы, так и в региональной сети сотовой связи.

3.4. Основные показатели систем спутниковой связи в целом

Зона обслуживания системы — совокупность (объединение) зон обслуживания отдельных КА, входящих в систему.

Пропускная способность системы — объединение пропускных способностей, входящих в систему КА.

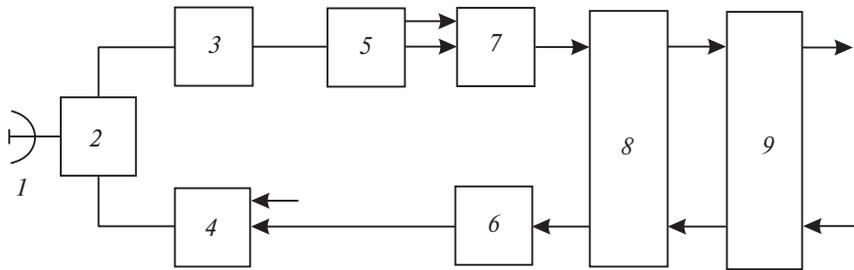
Система спутниковой связи характеризуется *числом и размещением ЗС, числом КА и типом их орбиты, «точкой стояния» на геостационарной орбите*, а также числом стволов на ИСЗ, их полосой пропускания, полосами частот стволов на участках Земля — спутник и спутник — Земля.

Важным для таких систем является метод *многостанционного доступа* — метод совмещения сигналов, излучаемых различными ЗС, для их прохождения через общий ствол бортового ретранслятора КС. Применяют МСД с разделением сигналов по частоте, форме и времени.

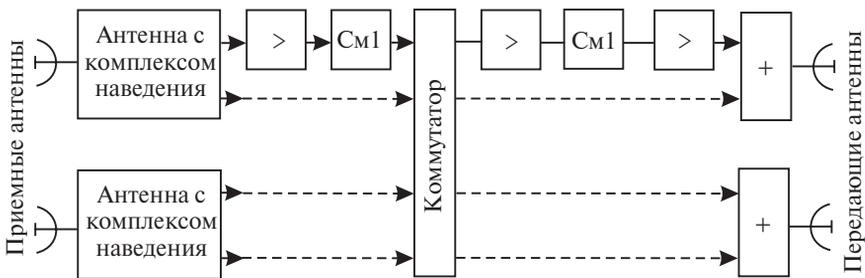
Упрощенные структурные схемы ЗС и КА представлены на рис. 7. Земные станции, предназначенные для дуплексной связи и работающие в нескольких стволах КА, строятся по схеме, изображенной на рис. 7, а.

Радиотехнический комплекс КА, входящий в ССС, состоит из антенн и бортового ретранслятора. На борту современных связных КА обычно устанавливают несколько приемных и передающих антенн. Это объясняется необходимостью сформировать различные зоны обслуживания с целью привести в соответствие излучение антенн с размещением ЗС на поверхности Земли.

Высокая направленность приемных и передающих антенн КА способствует также уменьшению взаимных помех с другими системами связи — спутниковыми и наземными, повышает эффективность использования геостационарной орбиты.



a



б

Рис. 7. Упрощенные структурные схемы многоствольной приемопередающей ЗС (*a*) и КА (*б*):

1 – антенна с комплексом наведения, используемая обычно одновременно для приема и передачи; *2* – фильтр разделения приема и передачи; *3* – малошумящий усилитель; *4* – устройство сложения (фильтр сложения) сигналов передатчиков различных стволов; *5* – устройство разделения (фильтр разделения) принимаемых сигналов различных стволов; *6* – передающее устройство ствола; *7* – приемное устройство ствола; *8* – каналобразующая аппаратура ствола; *9* – аппаратура соединительной линии; См – смеситель

Принятый антенной КА сигнал поступает на входное малошумящее устройство, как это показано на рис. 7, *б*, в качестве которого на КА применяют смесители, усилители на малошумящих лампах бегущей волны (ЛБВ) или транзисторах. Принятый сигнал усиливается на частоте приема, промежуточной частоте и частоте передачи. В современных КА часто осуществляется не двукратное, а однократное преобразование частоты, непосредственно с входной в выходную, при этом усилитель промежуточной частоты (УПЧ) отсутствует.

Могут применяться также устройства разделения, коммутации, объединения сигналов (коммутатор на рис. 7), цель которых – подать сигналы, адресованные тем или иным ЗС, на передающие антенны с соответствующей зоной обслуживания. Перспективны системы с быстродействующей переориентацией узкого луча антенны (с коммутацией луча), что позволяет осуществлять связь со многими ЗС через остронаправленные антенны, не увеличивая числа антенн на борту КА, многократно использовать полосу частот.

Иногда на КС выполняется более сложная обработка сигналов, например преобразование вида модуляции, регенерация сигналов, передаваемых в дискретной форме.

4. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК

В первом приближении движение КА происходит под действием сил инерции в гравитационном поле Земли. В соответствии с первым законом Кеплера в невозмущенном движении орбита КА есть кривая второго порядка, в одном из фокусов которой находится центр силы притяжения. Таким образом, орбита материальной точки в невозмущенном движении – это некоторое коническое сечение, т. е. окружность, эллипс, парабола или гипербола.

Наиболее эффективным способом представления орбитального движения КА является представление в элементах орбиты (рис. 8).

Положение КА в пространстве характеризуется шестью элементами орбиты: большой полуосью орбиты – a , эксцентриситетом орбиты – e , долготой восходящего узла – Ω , аргументом перицентра – ω , наклоном орбиты – i и средней аномалией в эпоху – M или истинной аномалией – v . Размер, форму и положение орбиты в пространстве задают три элемента орбиты – Ω , ω , i .

Как показано на рис. 8, линия узлов – линия пересечения орбитальной плоскости с плоскостью экватора; долгота восходящего узла Ω отсчитывается от точки весеннего равноденствия Υ (знак созвездия Овна) до линии узлов. Угол наклона плоскости орбиты отсчитывается от плоскости экватора. Аргумент перицентра отсчитывается от линии узлов до перигея орбиты КА.

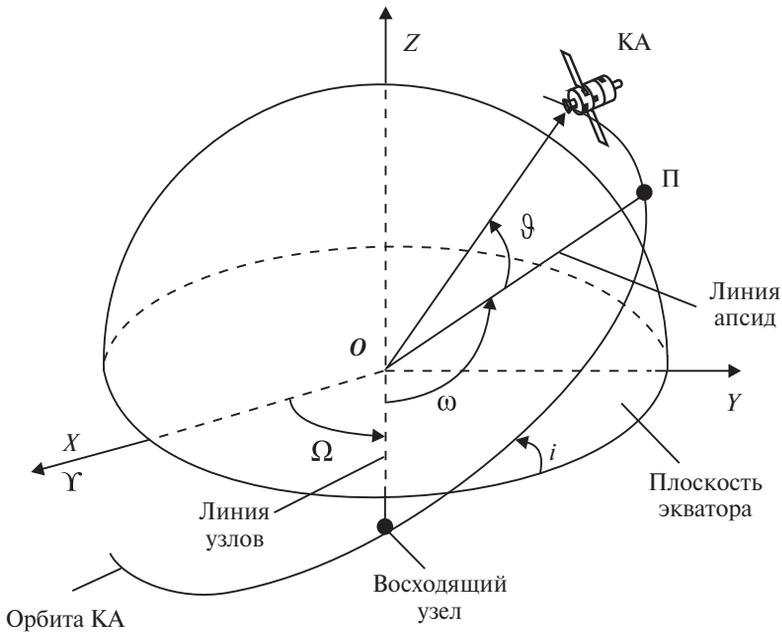


Рис. 8. Ориентация орбитальной плоскости КА

Основные параметры эллиптической орбиты приведены на рис. 9. Перигей П – орбитальная точка, которой соответствует минимальное значение радиус-вектора КА; апогей А – орбитальная точка, которой соответствует максимальное значение радиус-вектора КА.

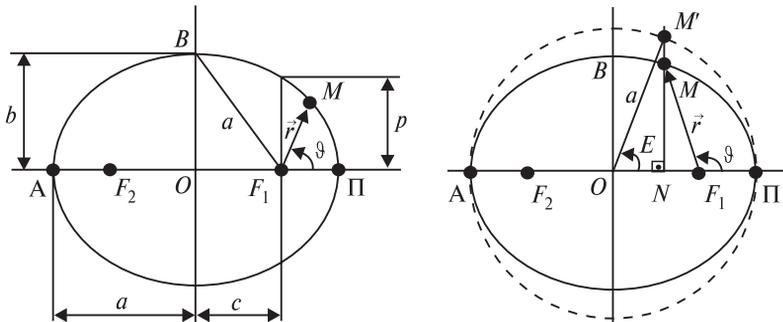


Рис. 9. Основные параметры эллиптической орбиты

Пять элементов орбиты a, e, Ω, ω, i неизменны во времени и лишь шестой элемент M или v определяет местоположение КА на орбите в определенную эпоху (момент времени).

Истинная аномалия v характеризует неравномерное для земного наблюдателя движение КА по эллиптической орбите, а средняя аномалия характеризует предполагаемое положение КА на круговой орбите, которое является равномерным для земного наблюдателя.

Средняя аномалия задается углом E , который называется эксцентрической аномалией:

$$M = E - e \cdot \sin E. \quad (1)$$

Для приема и передачи информации антенными системами земной станции при описании движения КА используется *топоцентрическая пунктовая система координат* (рис.10).



Рис. 10. Топоцентрическая пунктовая система координат

Начало – в точке M расположения пункта наблюдения (антенны земной станции), ось Z_1 – по внешней нормали к земному эллипсоиду, а ось X_1 направлена на Северный полюс Земли по касательной к меридиану пункта наблюдения, а ось Y_1 дополняет систему до правой. Пункт наблюдения определяется геодезической широтой φ_M и долготой λ_M .

В топоцентрической пунктовой системе координат положение КА характеризуется двумя угловыми величинами – азимутом A и углом места γ . Угол места (или угол возвышения) – это угол между направлением на КА (линия MS) и плоскостью касательной к поверхности Земли в точке M , азимут – это угол в точке M между направлением на север и проекцией направления КА (линия MB) на плоскость, касательную к поверхности Земли (линия MD).

Важнейший параметр орбиты – *период обращения* T – определяется как промежуток времени между двумя последовательными прохождениями КА через одну и ту же точку орбиты. Для установления связи удобно, чтобы КА появлялся над одними и теми же районами Земли в одно и то же время. Этому требованию отвечают *синхронные орбиты* с периодом обращения, кратным времени оборота Земли вокруг своей оси (звездным суткам, $T_3 = 23$ ч 56 мин 4 с), т. е.

$$T = T_3 / N, \quad (2)$$

где N – число оборотов КА вокруг Земли за сутки. По законам Кеплера, чем ниже орбита КА, тем меньше период его обращения.

В последнее время возрос интерес к использованию для связи КА на низких и отчасти средних орбитах. Из-за меньших потерь на трассе Земля – спутник стало возможным создание принципиально нового типа ССС – системы подвижной персональной связи с терминалом размером с обычную телефонную трубку.

Высота низких орбит обычно составляет не более 1500 км, поскольку выше располагаются пояса повышенной радиации, причиняющие вред элементам КА.

Низкие и средние орбиты используются только как круговые и полярные (или близкие к полярным), поскольку только так спутник на низкой орбите постепенно, делая оборот за оборотом, «обойдет» всю поверхность Земли. Чтобы с помощью спутников на низких орбитах добиться непрерывной связи в реальном масштабе времени, необходимо вывести целое «созвездие» спутников, сменяющих друг друга в необходимом районе. Учитывая сравнительно медленное суточное вращение Земли, спутники надо вывести на несколько полярных орбит, плоскости которых смещены. Если КА движется с запада на восток по круговой и экваториальной (наклонение $i = 0$) орбите с периодом обращения, равным длительности звездных суток, то он становится *геостационарным*, а его орбита называется орбитой геостационарного спутника или, проще, – *геостационарной орбитой* (ГСО) с высотой 35 875 км.

4.1. Вычисление координат космического аппарата на моменты обсервации по элементам орбиты для невозмущенного движения

Как было сказано выше, наиболее эффективным способом представления орбитального движения КА является представление в элементах орбиты в силу того, что единственный изменяемый параметр при невозмущенном движении — это средняя аномалия в эпоху M . Обозначим в качестве начальной эпохи момент t_0 , а в качестве эпохи, на которую необходимо получить прямоугольные координаты КА, — t . Тогда средняя аномалия на любой момент излучения электромагнитного сигнала КА

$$M = M_0 + n \cdot (t - t_0), \quad (3)$$

где n — среднее движение КА или средняя угловая скорость КА по орбите

$$n = \frac{\sqrt{\mu}}{a \cdot \sqrt{a}}. \quad (4)$$

Методом последовательных приближений находят эксцентрическую аномалию

$$E_{k+1} = M + e \cdot \sin E_k. \quad (5)$$

В качестве начального приближения E_0 берут среднюю аномалию, т. е. $E_0 = M$. По формуле Бруте — Чефола находят численное значение для $(\vartheta - E)$:

$$\vartheta - E = 2 \arctg \left(\frac{e \cdot \sin E}{1 + \sqrt{1 - e^2 + e \cdot \cos E}} \right). \quad (6)$$

На основании соотношения (6) можно записать:

$$\vartheta = E + (\vartheta - E). \quad (7)$$

Радиус-вектор КА на момент обсервации находим из следующего соотношения:

$$r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \vartheta}. \quad (8)$$

Пусть $\cos(r, X) = \alpha$, $\cos(r, Y) = \beta$, $\cos(r, Z) = \gamma$. Распишем через элементы орбиты α , β , γ :

$$\begin{aligned} \alpha &= \cos U \cdot \cos \Omega - \sin U \cdot \sin \Omega \cdot \cos i, \quad \beta = \cos U \cdot \sin \Omega - \sin U \cdot \cos \Omega \cdot \cos i, \\ \gamma &= \sin U \cdot \sin i, \quad \alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда

$$X = r \cdot a, \quad Y = r \cdot \beta, \quad Z = r \cdot \gamma. \quad (10)$$

Продифференцировав по времени выражения (10), получим формулы для проекций скорости КА на оси координат:

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{X}{r} \cdot V_r + (-\sin U \cdot \cos \Omega - \cos U \cdot \sin \Omega \cdot \cos i) \cdot V_n, \\ V_y &= \frac{Y}{r} \cdot V_r + (-\sin U \cdot \sin \Omega + \cos U \cdot \cos \Omega \cdot \cos i) \cdot V_n, \\ V_z &= \frac{Z}{r} \cdot V_r + \cos U \cdot \sin \Omega \cdot \cos i \cdot V_n, \end{aligned} \quad (11)$$

где V_r – радиальная скорость КА; V_n – трансверсальная скорость КА:

$$V_r = \sqrt{\frac{\mu}{p}} \cdot e \cdot \sin v, \quad V_n = \sqrt{\frac{\mu}{p}} \cdot (1 + e \cdot \cos v), \quad (12)$$

где p – параметр орбиты, определяемый по формуле

$$p = a \cdot (1 - e^2). \quad (13)$$

Мы представили подробный алгоритм вычисления прямоугольных координат КА на моменты наблюдения для невозмущенного движения. Однако КА движется не только под действием притяжения материальной точки. Земля не является шаром и имеет неоднородное гравитационное поле, кроме того, на КА действуют возмущающие ускорения от гравитационного поля Луны, Солнца, Юпитера. КА находится под действием солнечного ветра, магнитного поля Земли и других возмущающих факторов. В силу этого движение КА не является кеплеровым, т. е. шесть элементов орбиты непрерывно изменяются, являясь сложными функциями времени, поэтому орбиту КА только в первом приближении можно рассматривать как эллипс.

4.2. Расчет зоны покрытия

Одной из важнейших характеристик системы спутниковой связи является *зона покрытия*. В общем случае зону покрытия определяют как часть поверхности земного шара (или часть зоны видимости), в пределах которой обеспечивается уровень сигналов от спутника, необходимый для их приема с заданным качеством, а также гарантируется способность приема на входе КА сигналов от земной станции, обладающей определенными параметрами (определенной ЭИИМ).

Наиболее широко распространенные на практике зоны покрытия:

- глобальные (вся видимая с КА часть поверхности Земли при малой неравномерности усиления бортовой антенны, ширина луча антенны КА при этом составляет около $17,4^\circ$ для угла прихода 0°);

- полуглобальные;

- зональные.

Построение зоны покрытия КА на карте состоит из четырех этапов. Рассмотрим построение зоны покрытия КА на примере геостационарного спутника. На первом этапе определяют *зону видимости*. Для этого необходимо решить геометрическую задачу определения угла места для земной станции в некоторой точке земной поверхности. Угол места θ определяется выражением

$$\theta = \arcsin \frac{K \cos \psi_0 - 1}{\sqrt{1 + K^2 - 2K \cos \psi_0}}, \quad (14)$$

где $K = (R_3 + h) / R_3$ – отношение радиуса орбиты КА и радиуса Земли R_3 (для геостационарной орбиты $K \approx 6,61$); ψ_0 – центральный угол; h – высота орбиты (для геостационарной орбиты $h = 35\,786$ км).

Для угла места равного $\theta = 0^\circ$ условием видимости спутника является неравенство

$$\cos \varphi_{3C} \cos \Delta \lambda \geq 0,151, \quad (15)$$

где φ_{3C} – широта земной станции; $\Delta \lambda$ – разница долгот ЗС и подспутниковой точки КА.

Однако из-за отрицательного воздействия эффектов атмосферного происхождения, из-за интерференции прямого сигнала от КА с сигналом, отраженным от Земли, а также воздействия на антенну шумов Земли через главный лепесток ее диаграммы направленности рекомендуется ограничивать углы места антенны ЗС величиной 5° и более.

Тогда соотношение (15) примет вид

$$\cos \varphi_{3C} \cos \Delta \lambda \geq 0,236. \quad (16)$$

Условная зона покрытия КА для углов места 5° и более схематично представлена на рис. 11. Для покрытия видимой территории Земли с геостационарного КА (глобальная зона покрытия) при работе земных станций сети с углами места 5° и более ширина диаграммы направленности антенны КА должна составлять $\theta_{0,5} = 17,32^\circ$.

Вторым этапом является определение *зоны, в которой КА создает необходимую плотность потока мощности*. Для этого необходимо провести энергетический расчет радиолинии КА – Земля по направлениям, соединяющим КА с различными точками земной поверхности.

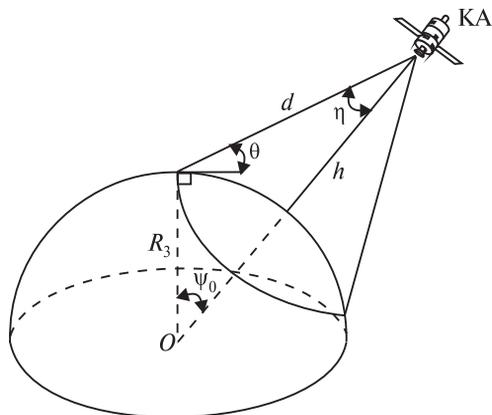


Рис. 11. Зона покрытия КА для углов места антенны ЗС величиной 5° и более

Для приближенного построения зоны, в которой КА создает необходимую плотность потока мощности, можно воспользоваться представлением поверхности Земли, как она видна с геостационарного КА. Для этого следует ввести сферическую систему координат (рис. 12), начало которой совмещено с точкой C расположения КА: N – Северный полюс Земли; O – центр Земли.

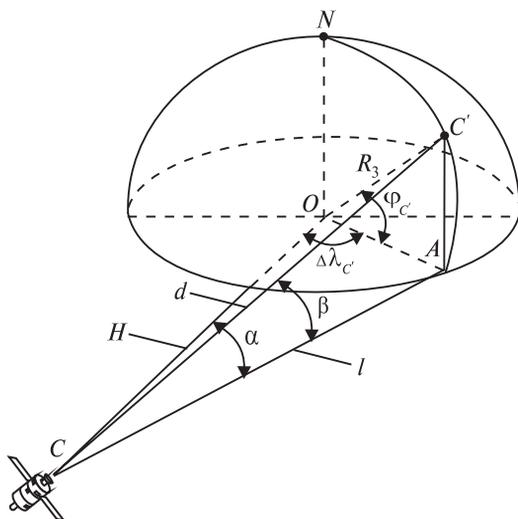


Рис. 12. Сферическая система координат, начало которой совмещено с точкой расположения КА

Положение некоторой точки C' на земной поверхности определяется относительно направления на центр Земли углами α (в плоскости экватора) и β (над плоскостью экватора), где $C'A$ – перпендикуляр к плоскости экватора из точки C' ; $\varphi_{C'}$ – широта точки C' ; $\Delta\lambda_{C'}$ – разница долгот точки C' и подспутниковой точки КА; $R_3 = 6371$ км – средний радиус Земли; d – наклонная дальность от КА до точки C' ; $H = 42\,157$ км – радиус геостационарной орбиты; l – расстояние от КА до проекции точки C' на плоскость экватора.

Для проведения энергетического расчета радиолинии КА – Земля (для антенны с эллиптическим или круговым сечением луча) для некоторой точки C' на поверхности Земли сначала определяют усиление бортовой антенны в направлении рассматриваемой точки с земной поверхности, дБ:

$$G_0(\varphi_{C'}) = G_{\max} - 12 \left(\frac{\eta_{C'}}{\eta_{-3}^{C'}} \right), \quad (17)$$

где $G_{\max} = 44,45 - 10\lg(\varphi_{01}\varphi_{02})$ – максимальный коэффициент усиления антенны, дБ; $\varphi_{01}\varphi_{02}$ – ширина луча по половинной мощности в поперечном сечении по большой и малой оси соответственно; $\eta_{C'}$ – угол с КА между точками точкой C' и прицеливания, град; $\eta_{-3}^{C'}$ – ширина диаграммы направленности антенны по уровню – 3 дБ в направлении на точку C' , град.

Затем определяем плотность потока мощности (ППМ), создаваемую КА у поверхности Земли в рассматриваемой точке, дБ · Вт/м²:

$$\Pi_0 = P_{\text{пер}} + G_{\text{пер}}(\varphi) - b_{\text{пер}} - 10\lg(4\pi d^2) - A_{\Gamma} - A_{\text{P}}, \quad (18)$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика КА, дБ · Вт; $G_{\text{пер}}(\varphi)$ – коэффициент усиления антенны КА в направлении рассматриваемой точки на поверхности Земли, дБ; $b_{\text{пер}}$ – потери в фидерном тракте передатчика, дБ; d – наклонная дальность от КА до рассматриваемой точки на поверхности Земли, м; A_{Γ} – ослабление радиосигнала в газах атмосферы, дБ; A_{P} – затухание радиосигналов в гидрометеорах, дБ.

Производится расчет ППМ для набора точек, расположенных с некоторым шагом относительно друг друга на земной поверхности (координатная сетка). Шаг расположения точек определяется степенью, необходимой детализации расчета. Далее точки с равными значениями ППМ соединяются на карте замкнутыми линиями. Тем самым на карте получается набор контуров с равным уровнем ППМ.

На третьем этапе определяется зона, которая отвечает условию приема космической станцией с необходимым качеством сигналов от находящейся в пределах зоны видимости земной станции с нормированной в данной системе ЭИИМ. По известным параметрам ЗС и заданном отношении сигнал/шум ($P_c/P_{ш}$) на входе приемника космической станции, а также известной диаграмме направленности приемной антенны спутника необходимо определить значение ЭИИМ_{ЗС}, расположенной в любой точке видимой области земной поверхности, достаточной для приема сигналов с необходимым качеством, дБ · Вт/Гц:

$$\begin{aligned} \text{ЭИИМ}_{ЗС} = P_c/P_{ш} - G_{КА}(\varphi) + L_0 + L_{\text{доп}} - \\ - 228,6 + 10\lg(T_{\text{шкк}} + 270), \end{aligned} \quad (19)$$

где $P_c/P_{ш}$ – отношение сигнал/шум на входе демодулятора КА, дБ; $G_{КА}(\varphi)$ – коэффициент усиления антенны КА в направлении на конкретную контрольную точку, дБ; L_0 – потери передачи в свободном пространстве, дБ.

Далее точки с равными значениями ЭИИМ соединяются на карте замкнутой кривой.

На заключительном четвертом этапе на карту наносятся все три определенные выше зоны и строится их внутренняя огибающая. Таким образом, зоной покрытия является территория, принадлежащая каждой из трех построенных зон, т. е. территория, на которой выполняются условия радиовидимости и условия необходимого качества связи на линиях КА – Земля и Земля – КА.

В некоторых системах (чаще в системах спутникового вещания) создаются различные зоны покрытия для линий КА – Земля и Земля – КА. В этом случае зоны покрытия для линий «вверх» и «вниз» будут различны. Зона покрытия для линии «вниз» находится как объединение зон, определенных на этапах 1 и 2, а зона покрытия на линии «вверх» – на этапах 1 и 3. Отметим, что представленный на этапах 2 и 3 расчет зон не совсем точен, так как не учитывает нестабильность положения КА на орбите и нестабильность ориентации его антенн. В связи с этим для точного расчета зоны покрытия необходимо определить ту часть поверхности Земли, где заданное качество связи обеспечивается при любых, даже самых неблагоприятных, сочетаниях параметров, характеризующих нестабильность КА и точность удержания луча. Иными словами, необходимо найти внутреннюю огибающую зон покрытия для разных сочетаний величин, определяющих положение КА и положение его антенн.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

5.1. Основные энергетические уравнения спутниковых радиолинии

Линия спутниковой связи состоит из двух участков – Земля – КА и КА – Земля. Каждый из участков, как показано на рис. 13, содержит передающее и приемное устройство, антенные системы с соответствующими антенно-фидерными трактами (АФТ) и, наконец, канал связи, образованный участком пространства между земной станцией (ЗС) и космическим аппаратом.



Рис. 13. Линия спутниковой связи

В энергетическом смысле оба участка оказываются напряженными, первый – из-за стремления к уменьшению мощности передатчиков и упрощению ЗС (в особенности в системах с большим числом малых приемо-передающих ЗС, работающих в необслуживаемом режиме), второй – из-за ограничений на массу, габаритные размеры и энергопотребление бортового ретранслятора, лимитирующих его мощность.

Основной особенностью спутниковых линий является наличие больших потерь сигнала, обусловленных затуханием (ослаблением и рассеянием) его энергии на трассах большой физической протяженности. Так, при высоте орбиты КА 36 тыс. км затухание сигнала на трассе может достигать 200 дБ. Помимо этого основного затухания в пространстве сигнал в линиях спутниковой связи подвержен влиянию большого числа других факторов, таких как поглощение в атмосфере, фарадеевское вращение плоскости поляризации, рефракция, деполяризация и т. д. С другой стороны, на приемное устройство КА и ЗС кроме собственных флуктуационных шумов воздействуют разного рода помехи в виде излучения Солнца, космоса и планет.

В этих условиях правильный и точный учет влияния всех факторов позволяет осуществить оптимальное проектирование ССС, обеспечить

ее нормальную работу и в то же время исключить излишние энергетические запасы, приводящие к неоправданному увеличению сложности земной и бортовой аппаратуры. Приходится учитывать характер и число передаваемых сигналов, а также характер их преобразования (обработки) в спутниковом ретрансляторе. В простейшем случае, например при передаче программ телевидения, бортовой ретранслятор работает в односигнальном режиме, типичном для наземных радиорелейных линий, и лишь усиливает ретранслируемый сигнал. При передаче телефонных сигналов с многостанционным доступом через бортовой ретранслятор проходит несколько сигналов, разделенных по частоте, времени или форме, оказывающих взаимное влияние, которое должно учитываться при расчете энергетики спутниковых линий. В зависимости от типа и назначения системы на борту может применяться та или иная обработка сигнала, в том числе его полная регенерация, уменьшающая накопление шумов и искажений, возникающих на участках трассы.

Введем обозначения: $P_{\text{пер}}$ – эффективная мощность на выходе передатчика; $\eta_{\text{пер}}$ – коэффициент передачи по мощности (КПД) АФТ; $G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления передающей антенны относительно изотропного излучателя.

Введем понятие *эквивалентной изотропной излучаемой мощности* (ЭИИМ):

$$P_{\text{эк}} = P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}}, \quad (20)$$

которая является произведением мощности передатчика на усиление антенны. В теории ССС эту характеристику рассматривают как один из важнейших показателей ССС. Отметим также, что параллельно с ЭИИМ для характеристики энергетических показателей ССС вводят также понятие *добротности станции*:

$$Q = \frac{G}{T}, \quad (21)$$

где G – усиление антенны на частоте приема; T – суммарная шумовая температура станции.

Если считать, что излучаемая волна сферическая и распространяется во всех направлениях равномерно, то с изменением расстояния плотность потока мощности уменьшается пропорционально квадрату расстояния d , т. е.

$$W = \frac{P_{\text{эк}}}{4\pi d^2} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}}}{4\pi d^2}, \quad (22)$$

а напряженность поля на том же расстоянии будет иметь вид:

$$E = \sqrt{30 \cdot P_{\text{эк}}} / d = \sqrt{120 \cdot \pi \cdot W}. \quad (23)$$

Отметим, что выражение (22) получено с учетом того, что модуль вектора Пойтинга $\Pi_0 = E_0 H_0$, Вт/м², и для плоской волны справедливо равенство $H_0 = E_0 / \rho_0 = E_0 / 120\pi$, поскольку волновое сопротивление свободного пространства $\rho_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = 120\pi$, так как $\xi_0 = 10^{-9} / 36\pi$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Будем считать, что в точке приема антенна имеет эффективную площадь апертуры, равную $S_{\text{эф}}$; АФТ приемника имеет коэффициент передачи $\eta_{\text{пр}}$ и обеспечивается полное согласование волновых сопротивлений антенны, АФТ и приемника. Тогда мощность входного сигнала приемника

$$P_{\text{пр}} = W \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot S_{\text{эф}} = \frac{P_{\text{эк}} \eta_{\text{пр}} \cdot S_{\text{эф}}}{4\pi d^2} = \frac{P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \cdot S_{\text{эф}} G_{\text{пер}}}{4\pi d^2}. \quad (24)$$

Эффективная площадь апертуры связана с коэффициентом усиления антенны следующим выражением:

$$G_{\text{пр}} = \frac{4\pi S_{\text{эф}}}{\lambda^2}, \quad (25)$$

т. е. из выражения (25) получаем:

$$S_{\text{эф}} = \frac{G_{\text{пр}} \cdot \lambda^2}{4\pi}. \quad (26)$$

Подставляя уравнение (26) в соотношение (25), запишем:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} G_{\text{пер}}}{(4\pi d \lambda)^2} = \frac{P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} G_{\text{пер}}}{L_{\text{СВ}}}. \quad (27)$$

В выражении (27) числитель характеризует аппаратные параметры линии, а знаменатель – потери в свободном пространстве. В теории радиолокации уравнение (27) называют основным уравнением радиолокации, устанавливающим связь между мощностями приема и передачи сигналов в свободном пространстве. В этом уравнении не учтено влияние шумов и оно является лишь отражением так называемых основных потерь $L_{\text{СВ}} = (4\pi d / \lambda)^2$. Очевидно, что кроме них существует и ряд дополнительных потерь, упомянутых ранее. Суммарные потери могут быть учтены, если в знаменатель выражения (27) вместо $L_0 = (4\pi d / \lambda)^2$ подставить множитель

$$L_{\Sigma} = L_0 \cdot L_{\text{доп}}, \quad (28)$$

где $L_{\text{доп}}$ – дополнительные потери.

Соответственно, воспользовавшись уравнением (27), определим мощность передатчика участка линии связи ССС

$$P_{\text{пер}} = \frac{16 \pi^2 R^2 P_{\text{пр}} L_{\text{доп}}}{\lambda^2 \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} G_{\text{пер}}}, \quad (29)$$

где R – расстояние между точками приема и передачи (наклонная дальность).

Если вместо мощности сигнала задано соотношение сигнал/шум на входе приемника $(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$, то вместо $P_{\text{пр}}$ в формулу (29) необходимо подставить выражение $P_{\text{ш}}(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$, где $P_{\text{ш}}$ – полная мощность шума на входе приемника. С учетом этого, а также того, что суммарная мощность аддитивных шумов, связанных в основном с тепловыми процессами, может быть аппроксимирована как

$$P_{\text{ш}} = k T_{\Sigma} \Delta f_{\text{ш}}, \quad (30)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц · град) – постоянная Больцмана; $\Delta f_{\text{ш}}$ – эквивалентная шумовая полоса приемника, Гц; T_{Σ} – эквивалентная шумовая температура приемной станции, приведенная ко входу приемника.

Получим выражения для расчета мощности передатчиков на линиях Земля – КА и КА – Земля. При этом принадлежность показателя, относящегося к Земле (земной станции) будем обозначать индексом «З», а к бортовой аппаратуре КА – индексом «Б». Соответственно, длину трассы и длину волны линии Земля – КА обозначим цифрой 1, а линии КА – Земля – цифрой 2.

Для участка Земля – КА:

$$P_{\text{пер.З}} = \frac{16 \pi^2 R_1^2 L_{1\text{доп}} P_{\text{ш.Б}}}{\lambda_1^2 \eta_{\text{пер.З}} \eta_{\text{пр.Б}} \cdot G_{\text{пр.Б}} G_{\text{пер.З}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.Б}}. \quad (31)$$

Для участка КА – Земля:

$$P_{\text{пер.З}} = \frac{16 \pi^2 R_2^2 L_{2\text{доп}} P_{\text{ш.З}}}{\lambda_2^2 \eta_{\text{пер.Б}} \eta_{\text{пр.З}} \cdot G_{\text{пр.З}} G_{\text{пер.Б}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.З}}. \quad (32)$$

Общее уравнение всей линии связи, состоящей из двух участков, будет зависеть от связи между суммарным отношением сигнал/шум на всей линии связи $\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}$ и отношениями $\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.Б}}$, $\left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.З}}$. Если на борту КА не

проводится специальная «оптимальная» обработка, то можно считать, что шумы всех участков линии связи складываются, а следовательно, необходимо, чтобы отношение сигнал/шум на каждом участке линии связи было больше, чем на всей линии, т. е.

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{вх.Б}} &> \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\Sigma}, & \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{вх.Б}} &> a \cdot \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\Sigma}, \\ \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{вх.З}} &> \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\Sigma}, & \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{вх.Б}} &> b \cdot \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\Sigma}, \end{aligned} \quad (33)$$

причем коэффициенты запаса a и b должны быть больше единицы, т. е. $a > 1, b > 1$. Поскольку при сложении шумов первой и второй линий справедливо равенство

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)^{-1} = \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{вх.Б}}^{-1} + \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{вх.З}}^{-1}, \quad (34)$$

то, решив совместно уравнения (33) и (34), получим:

$$a = \frac{b}{b-1}. \quad (35)$$

С учетом выражений (30) и (33) запишем окончательные энергетические уравнения линии связи

$$\begin{aligned} P_{\text{пер.З}} &= \frac{16\pi^2 R_1^2 k T_{\Sigma} \Delta f_{ш} L_{\text{длп}}}{\lambda_1^2 \eta_{\text{пер.З}} \eta_{\text{пр.Б}} \cdot G_{\text{пр.Б}} G_{\text{пер.З}}} a \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{вх.Б}} \\ P_{\text{пер.З}} &= \frac{16\pi^2 R_2^2 L_{\text{длп}} k T_{\Sigma} \Delta f_{ш.Б}}{\lambda_2^2 \eta_{\text{пер.Б}} \eta_{\text{пр.З}} \cdot G_{\text{пр.З}} G_{\text{пер.Б}}} b \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\text{вх.З}}. \end{aligned} \quad (36)$$

В уравнения (36) входят все основные параметры бортовой и наземной аппаратуры, а также наклонные дальности R_1 и R_2 , которые при многостанционном приеме (в данном случае двухстанционном) различны. Кроме того, фигурирующие в выражении (36) коэффициенты запаса в общем случае выбирают произвольно, но с учетом их связи в выражении (35). Понятно, что при этом должен быть разумный компромисс между мощностями земного и бортового передатчиков и основную нагрузку по запасу мощности должен брать на себя земной комплекс, поскольку увеличение b приведет к неоправданно большому энергетическим и экономическим затратам бортовых систем ретранслятора. На практике коэффициент b выбирают в пределах $b = 1,1-1,3$. В этом случае коэффициент запаса земной станции $a = 1,1-4,3$. Величины $\eta_{\text{пер.З}}, \eta_{\text{пр.Б}}, \eta_{\text{пер.Б}}, \eta_{\text{пр.З}}$ зависят от конструктивно-технологических характеристик АФТ и обычно лежат в следующих пределах:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{пер.Б}} &= 0,65-0,9; & \eta_{\text{пр.Б}} &= 0,65-0,8; \\ \eta_{\text{пер.З}} &= 0,5-0,65; & \eta_{\text{пр.З}} &= 0,8-0,95. \end{aligned}$$

5.2. Краткая характеристика факторов, влияющих на энергетику спутниковых систем связи и диапазоны частот спутниковых линий

Поглощение энергии сигналов в атмосфере. Трасса ССС проходит через атмосферу Земли, которая оказывает существенное влияние на качество и надежность связи. Атмосфера имеет ярко выраженную частотную избирательность и через нее свободно проходят волны диапазона частот (ДЧ) от 30 МГц до 30 ГГц. Снизу этот ДЧ ограничивается ионосферными критическими частотами, а также общими потерями радиоволн в ионосфере. Ограничение сверху обусловлено поглощением атмосферными осадками и газами тропосферы (кислородом и водяным паром). На качество приема большое влияние оказывают внешние шумы (космические, шумы Солнца и тепловые шумы атмосферы), которые меньше всего в ДЧ 1–10 ГГц. Кроме того, выбор ДЧ определяется дисперсией радиоволн в ионосфере, возможностями создания соответствующей аппаратуры и ее частотными характеристиками. ССС используют широкий спектр частот, а дальнейшее стремление к увеличению пропускной способности ССС, внедрению широкополосных радиолиний, преимущественному использованию КА на геостационарных орбитах и необходимость решения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) требуют освоения более высоких частот. Уже освоен ДЧ 11–14 ГГц, который чаще всего используется КА на геостационарных орбитах. Успешно проводятся многочисленные эксперименты по освоению ДЧ 20–30 ГГц.

В соответствии с рекомендациями МККР в условиях «ясного неба» величину ослабления L_a в газах, выраженную в дБ, определяют как

$$L_{a0} = \frac{(\gamma_{O_2} h_{O_2} + \gamma_{H_2O} h_{H_2O})}{\sin \varphi_0}, \text{ при } \varphi_0 > 0, \quad (37)$$

где φ_0 – угол места земной станции, град.; γ_{O_2} и γ_{H_2O} – погонные ослабления в кислороде и водяном паре, зависящие от частоты и концентрации водяного пара, дБ/км; h_{O_2} , h_{H_2O} – эквивалентная толщина (высота) кислорода и водяного пара, км.

Эти величины могут быть рассчитаны следующим образом:

$$h_{O_2} = \begin{cases} 6, & \text{при } f < 50 \text{ ГГц,} \\ 6 + \frac{60}{1 + (f - 118,7)^2}, & \text{при } 70 < f < 370 \text{ ГГц,} \end{cases} \quad (38)$$
$$h_{H_2O} = 2,2 + \frac{3}{3 + (f - 22,3)^2} + \frac{0,3}{1 + (f - 118,7)^2}, \text{ при } f < 350 \text{ ГГц.}$$

На практике с достаточной степенью точности можно считать, что $h_{\text{O}_2} \approx 6$, $h_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2,2$.

Частотные зависимости суммарного молекулярного ослабления L_{a0} показаны на рис. 14. Видно, что с ростом частоты ослабление сигнала в тропосфере существенно увеличивается, и для миллиметровых волн это ослабление может достигать значений более 10 дБ по мощности.

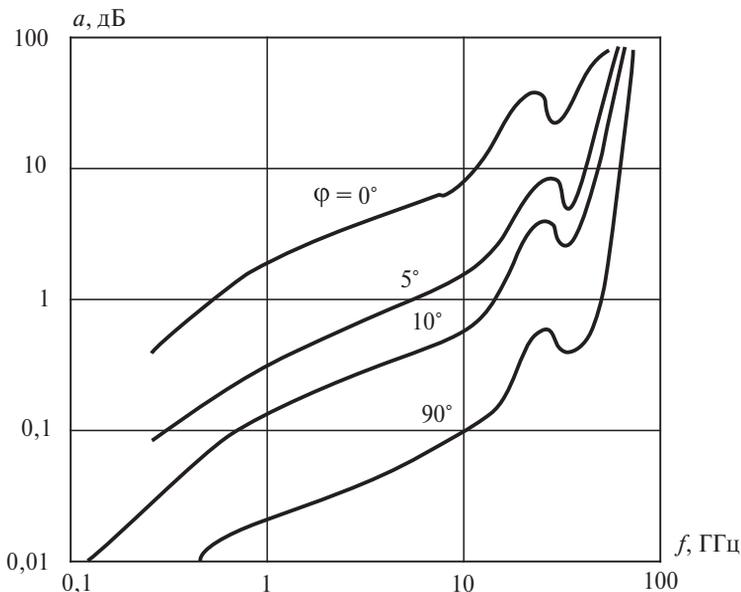


Рис. 14. Частотные зависимости суммарного молекулярного ослабления L_{a0}

Усредненные значения погонного ослабления в диапазоне частот от 10 до 20 ГГц приведены в табл. 7. Необходимо отметить то, что если ослабление в кислороде в этом диапазоне практически постоянно и в основном определяется эквивалентной толщиной слоя кислорода h_{O_2} , то поглощение в парах воды зависит от плотности водяного пара ρ , г/м³.

Плотность водяного пара $\rho = 7,5$ г/м³ является типичной (стандартной) для континентальных районов с умеренным климатом. Плотность $\rho = 20$ г/м³ характерна для нижних слоев тропосферы над морями субтропической и тропической зон, а также для прибрежных районов суши в этих широтах.

Усредненные значения погонного ослабления

Частота, ГГц	Ослабление в кислороде, дБ/км	Ослабление в парах воды при $\rho = 7,5$ г/м, дБ/км	Ослабление в парах воды при $\rho = 20$ г/м, дБ/км	Суммарное погонное ослабление, дБ/км
10,0	0,02	0,004	0,01	0,024–0,03
15,0	0,02	0,03	0,08	0,05–0,1
20,0	0,02	0,3	0,3	0,12–0,32

Если считать, что средние значения эквивалентных толщин слоев кислорода и водяного пара составляют 6 и 2,2 км соответственно, то с учетом данных табл. 7 можно рассчитать общее погонное ослабление L_{a0} , которое, в частности, на частоте 20 ГГц составляет

$L_{a0} = 0,02 \cdot 4 + 0,1 \cdot 2,2 = 0,32$ дБ при $\rho = 7,5$ г/м³ и $L_{a0} = 0,78$ дБ при $\rho = 20$ г/м³.

Ослабление сигнала, вызванное дождем. Интенсивность рассеивания и поглощения энергии радиоволн в дожде зависит от интенсивности дождя I_T , мм/ч. Кроме того, существенную роль играют размер области, занятой дождем, электрические свойства частиц, климатический район расположения наземной станции, а также такой фактор, как неравномерность дождя. Дожди сильной интенсивности локализованы и имеют ярко выраженное ядро большой интенсивности, а также обширную зону (крылья), в которой интенсивность убывает по мере удаления от ядра. Характерно и то, что чем выше интенсивность дождя, тем меньше его продолжительность. Так, например, по данным многочисленных наблюдений при интенсивности дождя 2–4 мм/ч диаметр дождевого облака равен примерно 30–45 км, а продолжительность дождя может составить от 5 до 13 часов, а при интенсивности 64 мм/ч эти же показатели равны 1 км и 0,06 ч соответственно. Важным фактором для расчетов ослабления сигнала в дождях является также их средняя продолжительность в данном климатическом районе или среднегодовая интенсивность, которая для этого района не превышает реальную продолжительность 99 % времени в году или, наоборот, превышает ее 0,01 % времени.

Строгая количественная оценка коэффициента ослабления в дожде с учетом всех влияющих факторов затруднена, и обычно используют усредненные эмпирические оценки для той или иной климатической зоны с учетом данных многочисленных экспериментальных наблюдений. Поэтому здесь приводится методика расчета ослабления сигнала в дожде, рекомендуемая МККР (отчет 564-2), в соответствии с которой

множитель ослабления в дожде, превышающий в 0,01 % времени года, определяют как

$$L_d = \gamma_d \cdot d_d \cdot r_{0,01}, \quad (39)$$

где γ_d – погонное ослабление сигнала в дожде, дБ/км; d_d – наклонная дальность в дожде; $r_{0,01}$ – фактор уменьшения, учитывающий неравномерность дождя в 0,01 % времени.

В этом случае сначала определяют высоту нулевой изотермы (линии постоянной температуры) в зависимости от широты земной станции

$$h_F = 5,1 - 2,151 \cdot \lg \left(1 + 10^{\frac{\varphi - 27}{25}} \right), \quad (40)$$

где φ – широта земной станции, град.

Затем определяют высоту дождя (в км)

$$h_d = \begin{cases} 0,6 \cdot h_F, & \text{при } 0^\circ \leq |\varphi| \leq 20^\circ, \\ [0,6 + 0,2 \cdot (|\varphi| - 20)] \cdot h_F, & \text{при } 20^\circ \leq |\varphi| \leq 40^\circ, \\ h_F, & \text{при } |\varphi| > 40^\circ \end{cases} \quad (41)$$

и далее вычисляют длину пути сигнала (в км) по наклонной трассе от станции до высоты дождя:

$$d_B = \frac{2(h_B - h_0)}{\left[\sin^2 \varphi_0 + 2(h_B - h_0) \right]^{1/2} + \sin \varphi_0}, \quad (42)$$

где h_0 – высота станции над уровнем моря.

Функции погонного ослабления γ_d для данной интенсивности I_d , в диапазоне частот 9–30 ГГц могут быть аппроксимированы степенной зависимостью

$$\gamma_d = \beta_d I_d^{\alpha_d}, \quad (43)$$

где коэффициенты α_d и β_d являются функциями частоты

$$\begin{aligned} \alpha_d &= 147 - 0,09 \sqrt{f}, \\ \beta_d &= -10^{-3} + 5,1 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2,45}. \end{aligned} \quad (44)$$

При этом частота f выражена в ГГц.

Фактор уменьшения $r_{0,01}$, учитывающий неравномерность дождя для 0,01 % времени, можно рассчитать как

$$r_{0,01} = \frac{90}{90 + 4d_d \cos \varphi_0}. \quad (45)$$

Ослабление сигнала в тумане и облаках. Ослабление сигнала в тумане и облаках существенно меньше, чем в дожде, даже в мощных конвекционных облаках, однако вероятность (длительность) ослаблений значительно больше. Так, например, распространение в облаках на частотах 10–30 ГГц может приводить к продолжительным ослаблениям сигнала в течение 5–10 % времени на 0,5–1 дБ и 4–5 дБ в малых процентах времени (порядка 0,1 %).

Ослабление в тумане зависит от количества жидкой воды в единице объема, т. е. от так называемой *водности* M_T , измеряемой в Г/м³. Значение множителя ослабления в тумане зависит также и от значения удельного погонного ослабления k_T , измеряемого в дБ · м³/(Г · км). Таким образом, множитель ослабления сигнала в тумане может быть представлен в виде

$$L_T = k_T \cdot M_T \cdot r_T, \quad (46)$$

где r_T – длина пути распространения сигнала в тумане. Значение множителя удельного погонного ослабления k_T в диапазоне частот 10–20 ГГц при температуре воздуха от –8 до –20 °С лежит в пределах 0,1–0,5 дБ · м³/(Г · км), а при температуре от 0 до 20 °С на частоте 12 ГГц этот коэффициент составляет 0,1–0,5 дБ · м³/(Г · км), т. е. с ростом температуры k_T уменьшается. Водность M_T зависит от оптической видимости и тем больше, чем меньше оптическая, как это показано в табл. 8.

Таблица 8

Зависимость водности M_T от оптической видимости

Водность, Г/м ³	2	1	0,5	0,2	0,1	0,05
Оптическая видимость, м	30	50	80	200	300	400

Вероятность появления туманов в равнинной местности в холодное время года составляет 3–5 % и 0,6–2 % – в теплое. Приземные туманы могут захватывать большие районы, при этом горизонтальные размеры таких туманов могут лежать в пределах от нескольких сот метров до нескольких сот километров, а вертикальные от 300 м до 2,5 км.

Диапазоны частот спутниковых линий. Распределение частот для стационарных, подвижных и телевизионных вещательных ССС представлено на рис. 15.

В обозначениях, используемых для связи диапазонов частот, на рис. 15 в числителе указывают ДЧ для линии «вверх» (ЗС – КА), а в знаменателе – ДЧ для линии «вниз» (КА – ЗС).

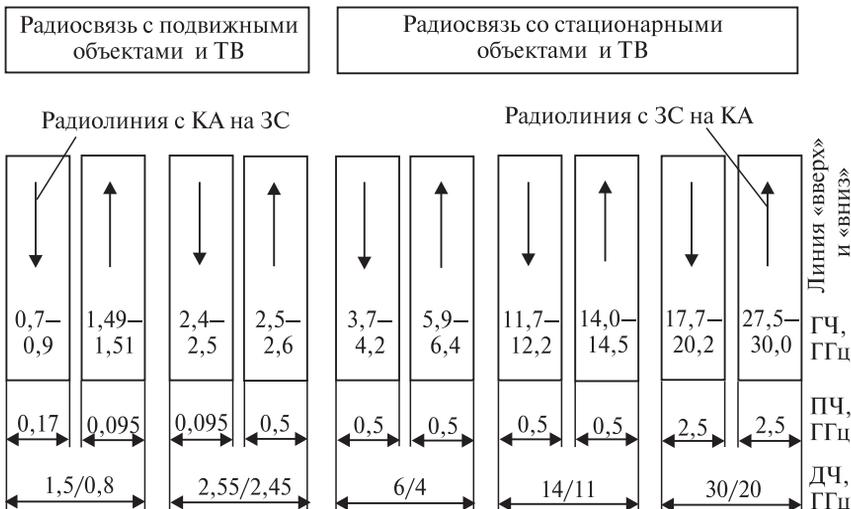


Рис. 15. Распределение частот для ССС: ГЧ – граничные частоты; ПЧ – полосы частот; ДЧ – диапазоны частот

В зарубежной литературе по ССС часто приводятся латинские буквенные обозначения ДЧ, которые приняты в системах военной и коммерческой связи США: Р – 225–400 МГц, L – 1–2 ГГц, S – 1–4 ГГц, C – 4–8 ГГц, X – 8–12,5 ГГц, Ku – 12,5–18 ГГц, K – 18–26,5 ГГц, Ka – 26,5–40 ГГц и др.

5.3. Влияние шумов искусственного происхождения на чувствительность приемника

Как правило, в технических характеристиках радиостанции реальная чувствительность приемника в некоторой полосе частот ΔF при соотношении сигнал/шум, равном q , где под шумами понимаются внутренние шумы приемника, т. е. заданы

$$m_{\text{реал}} = k \cdot T_0 \cdot \Delta F \cdot F \cdot q \quad (47)$$

либо

$$G_{\text{реал}} = \sqrt{k \cdot T_0 \cdot \Delta F \cdot F \cdot q \cdot \rho}, \quad (48)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана; T_0 – абсолютная температура окружающей среды; F – коэффициент шума приемника;

ρ – волновое сопротивление фидера; q – необходимое превышение мощности сигнала над мощностью помехи для осуществления уверенного приема.

Значения q определяются видом модуляции, используемой в линии радиосвязи, и представлено в табл. 9.

Таблица 9

Соотношение сигнал/шум q для различных видов приема

Вид приема	Значение q , дБ
Радиотелеграфия	4–20
Связная радиотелефония с АМ	12–20
Связная радиотелефония с ЧМ	3–10

На основании этих данных можно определить коэффициент шума приемника

$$F_{\text{реал}} = \frac{P_{\text{реал}}}{k \cdot T_0 \cdot \Delta F \cdot F \cdot q} = \frac{E_{\text{реал}}^2}{k \cdot T_0 \cdot \Delta F \cdot F \cdot q \cdot \rho} \quad (49)$$

В частности, для приемника с реальной чувствительностью, равной $E_{\text{реал}} = 0,35$ мкВ, в полосе $\Delta F = 15$ кГц при $q = 12$ дБ коэффициент шума составляет величину $F = 2,5$ (4 дБ), что находится на уровне наилучшего в диапазоне УКВ.

Однако в реальных условиях работы радиостанции, когда приемник и антенна разделены фидером конечной длины l с потерями β (погонное затухание фидера) коэффициент шума приемника необходимо увеличить из-за увеличения шумовой температуры приемника на активном сопротивлении потерь фидера. Дополнительное ухудшение реальной чувствительности приемника связано с влиянием внешних шумов. К ним относятся в диапазоне УКВ прежде всего:

- космические шумы;
- шумы искусственного происхождения.

Если космические шумы сравнительно невелики в диапазоне УКВ и уменьшаются с возрастанием рабочей частоты радиолинии, то их учет можно провести, введя относительную температуру антенны $t_a = T_a/T_0$, где T_a – шумовая температура антенны. Тогда

$$t_a \cong \frac{1,8 \cdot 10^6}{f_{\text{раб}}^3}, \quad (50)$$

где $f_{\text{раб}}$ – рабочая частота радиолинии в МГц, а коэффициент шума возрастает и становится равным

$$F' = F + t_a. \quad (51)$$

Для радиостанции с рабочей частотой равной 165 МГц температура антенны равна $t_a = 0,4$. Эта величина оказывается заниженной по сравнению с данными, приведенными в справочнике Национального бюро стандартов США, в котором приведены результаты подробного изучения искусственных шумов в работе подвижных систем УКВ радиосвязи. Частотная зависимость температуры космических шумов такая, что на частоте 165 МГц шумовая температура антенны достигает $T_a = 320$ К, т. е. $t_a = 1,066$, увеличивая коэффициент шума приемника на 40 %. С дальнейшим увеличением рабочей частоты радиолинии, т. е. с переходом в диапазон 450 или 900 МГц влиянием космических шумов можно пренебречь.

Следующей по значимости помехой для радиосвязи являются шумы искусственного происхождения. Под ними понимаются шумы от работающего оборудования, не предназначенного для излучения в радиодиапазоне. Эти шумы порождаются преимущественно случайными источниками, такими как шумовые излучения высоковольтных линий, системы автомобильного зажигания, промышленное оборудование (аппараты для дуговой сварки, аппараты для физиотерапии, СВЧ-печи и т. п.). В зависимости от типа и размеров города, уровня его промышленности индустриальный шум значительно отличается по интенсивности и степени влияния на чувствительность радиоприемных устройств. Можно рассматривать три типа местности:

- город с высокой плотностью застройки и значительной высотой зданий;
- пригород с менее высокой плотностью застройки и меньшей высотой зданий;
- сельская местность без промышленных объектов.

Для радиоволн УКВ диапазона, т. е. на частотах свыше 100 МГц, влиянием индустриальных шумов в сельской местности на чувствительность радиоприемного устройства радиостанции можно пренебречь, а учитывать это влияние необходимо только в городе и пригородной зоне, причем для оценки этого влияния можно использовать увеличение эффективного коэффициента шума:

$$F_{эф} = t_a + F(L - 1) + F_{ш} = t_a + F(L - 1) + \frac{T_{ш}}{T_0}, \quad (52)$$

где значения $F_{ш}$ находятся по табличным; L – потери в кабеле от антенны до входа приемника, равные

$$L = 10^{\beta \cdot l / 10}, \text{ или } L = \beta \cdot l, \quad (53)$$

где β – погонное затухание, дБ/м; l – длина кабеля, м.

При длинных снижениях можно ожидать достаточно больших потерь. Так, при $l = 50$ м и $\beta = 0,1$ дБ/м величина L составляет 3,16 (5 дБ). На частоте 165 МГц уровень промышленных шумов в пригородной зоне может достигать значений 290 дБ. Тогда эффективный коэффициент шума будет равен $F_{\text{эф}} = 1,066 + 2,5(3,16 - 1) + 100 = 106,5$ или 20,3 дБ, что значительно превышает коэффициент шума самого приемника. При этом ухудшение чувствительности составляет 16,3 дБ, т. е. реальная чувствительность приемника будет равна не 0,35 мкВ, а $E_{\text{реал}} = 2,3$ мкВ.

6. БОРТОВЫЕ РЕТРАНСЛЯТОРЫ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

6.1 Требования к бортовым ретрансляторам и их шумовые характеристики

Одним из основных требований, предъявляемых ко всем комплексам, входящим в состав бортовой аппаратуры и оборудования спутниковой связи, является их высокая надежность, обеспечивающая безотказную работу в условиях космического пространства в течение длительного времени. Наряду с этим выбор возможного варианта построения бортового оборудования должен определяться минимальным весом, минимальной потребляемой мощностью и наименьшими размерами. Технология изготовления отдельных элементов, блоков и деталей, входящих в состав бортового оборудования, а также методы их контроля обусловлены тем, что при запуске эти изделия будут подвергаться ударным и вибрационным воздействиям, а в космическом пространстве — радиации.

Бортовые ретрансляционные комплексы (БРТК) спутников связи и вещания представляют собой радиотехническое оборудование, устанавливаемое на спутниках. БРТК являются целевой или полезной нагрузкой КА и предназначены для приема сигналов от передающих ЗС, их усиления и последующей передачи в направлении приемных ЗС, входящих в состав этих систем.

В состав БРТК входят:

- приемные, передающие и/или приемно-передающие антенны со своими антенно-фидерными трактами и опорно-поворотными устройствами;
- приемно-передающее оборудование — бортовой ретранслятор (БРТР), осуществляющий ретрансляцию сигналов на спутнике.

Современные БРТР спутников – многоствольные радиотехнические комплексы. В зависимости от вида многостанционного доступа к спутнику – частотного разделения или временного разделения – сигналы в полосе ствола могут транслироваться на нескольких несущих (при МДЧР) или на одной несущей (при МДВР или передаче сигналов телевидения аналоговыми методами).

Выбор и разработка конструктивной схемы БРТР связаны с непрерывным и длительным пребыванием его в специфических условиях открытого космического пространства в составе КА.

Исполнение аппаратуры БРТР имеет ряд существенных отличий от исполнения аналогичной аппаратуры, находящейся в наземных условиях эксплуатации. К ним относится прежде всего применение специальных методов монтажа, напыления, т. е. использование специальных технологических процессов при изготовлении аппаратуры.

Мощность, которую необходимо получить на выходе передатчика БРТР (или ствола БРТР), зависит от функционального назначения системы, в которой работает данный БРТР. Чтобы снизить мощность, потребляемую от бортовых энергетических источников, стремятся увеличить коэффициент полезного действия БРТР, представляющий собой отношение полезной подводимой к антенне колебательной мощности к общей мощности, потребляемой БРТР от источника питания. Стремление повысить КПД обуславливает применение в наиболее энергоемком и объемном узле БРТР – выходном (передатчике) – экономичных электронных приборов: ламп бегущей волны, клистронов, транзисторов и т. п.

Специализированные стволы ретрансляторов, предназначенные для передачи конкретных видов сигналов при заданных видах многостанционного доступа, рассчитаны на длительную эксплуатацию (7–15 лет) и зачастую не могут эффективно применяться в течение всего срока службы, поскольку за такой период происходят значительные изменения:

- совершенствуются аппаратура ЗС и методы передачи информации;
- возрастает объем передаваемой информации и спрос на услуги, предоставляемые ССС.

Большинство отечественных и зарубежных КА, особенно работающие в системах фиксированной спутниковой службы, оснащаются ретрансляторами с универсальными стволами, чтобы эффективность их использования не снижалась. Универсальные стволы могут одинаково использоваться как в системах связи, так и в системах вещания и пригодны для систем с МДЧР и МДВР.

Несмотря на большое разнообразие, варианты построения ретрансляторов можно подразделить на несколько групп, отличающихся друг

от друга следующими основными признаками (определяемыми в основном принятым построением системы связи через КА):

- видами модуляции на участке Земля – КА и на участке КА – Земля;
- способом использования ретранслятора (однократное или многократное применение) и видом многостанционного доступа;
- требованием к обработке сигнала на борту спутника;
- методом ретрансляции сигнала (усиление на промежуточной частоте (ПЧ) или СВЧ, наличие или отсутствие в ретрансляторе детектирования и модуляции сигналов).

Одним из главных требований к БРТР является требование уверенного приема сигналов. Для повышения отношения сигнал/шум линии связи необходимо, чтобы величина шумов на входе приемного устройства ретранслятора была возможно меньшей. Для этого необходимо предельно снизить потери в фидерах и входных фильтрах, уменьшить величины шумов самого приемного устройства. Поэтому на входе ретранслятора следует применять малозумящий усилитель, однако выбор его существенно зависит от уровня шумов на входе приемника. Уровень шумов, приведенных ко входу приемника БРТР, определяется тепловыми шумами первых каскадов, шумами антенно-фидерного тракта и внешних источников: тепловыми шумами Земли и атмосферы, шумами Галактики, Солнца и планет. Следовательно, суммарная мощность шумов, отнесенная ко входу приемника, будет равна

$$P_{ш} = P_{ш.пр} + P_{ш.ф} + \eta' P_{ш.а}, \quad (54)$$

где $P_{ш.пр}$ – мощность собственных шумов приемника; $P_{ш.ф}$ – мощность шумов, создаваемых фидерными трактами и другими узлами; $\eta' P_{ш.а}$ – мощность шумов антенны с учетом тепловых шумов атмосферы, Земли и космических объектов; η' – КПД фидера, фильтров, циркуляторов и других устройств, находящихся между антенной и входом приемника.

Эквивалентная шумовая температура приемника связана с коэффициентом шума соотношением

$$T_{пр} = T_0(n - 1), \quad (55)$$

где $n = 5-20$ – коэффициент шума приемника; $T_0 = 290$ К – реальная температура приемника.

Мощность шумов приемника

$$P_{ш.пр} = n \cdot k \cdot T_0 \Delta f. \quad (56)$$

Аналогичным образом определяют мощность шумов и других источников, а суммарная мощность

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\Sigma} \Delta f \quad (57)$$

и, соответственно, суммарная эквивалентная шумовая температура

$$T_{\Sigma} = T_{\text{пр}} + T_{\phi} + \eta' T_{\text{а}}. \quad (58)$$

Эквивалентную температуру Земли обычно принимают равной 290 К. Однако уровень шума на входе приемника зависит также и от уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны. В современных антеннах за счет боковых лепестков шумовая температура увеличивается на 10–30 К. Это справедливо и для антенн земных станций. Эквивалентная температура атмосферы зависит от угла места и при $\phi = 0$ достигает 290 К. При ориентации антенн БРПР на Землю ее шумы будут преобладающими среди шумов других источников. Температура этих шумов составляет величину примерно 290 К. На частотах около 22 ГГц, соответствующих резонансному поглощению водяных паров, наблюдается повышение интенсивности шума. Плотность излучения Солнца зависит от его активности и на частотах порядка 3 ГГц изменяется от 10^{-20} до 10^{-19} Вт/(м² · Гц). Плотность излучения Луны на тех же частотах равна примерно $7,6 \cdot 10^{-22}$ Вт/(м² · Гц). Следует отметить, что величина углового диаметра Солнца составляет (для земного наблюдателя) 32 угл. мин, а диаметр Луны – 33,7 угл. мин. Поэтому вероятность того, что антенна будет точно ориентирована на Солнце и Луну, оказывается весьма малой, в противном случае эквивалентная температура Солнца и Луны повышется до 25 000 и 210 К соответственно.

Эквивалентная шумовая температура антенны равна сумме температур космических $T_{\text{кос}}$, атмосферных $T_{\text{атм}}$, омических $T_{\text{аэ}}$ шумов и шумов Земли $T_{\text{з}}$:

$$T_{\text{а}} = T_{\text{кос}} + T_{\text{атм}} + T_{\text{з}} + T_{\text{аэ}}. \quad (59)$$

Эквивалентная температура шумов собственного теплового радиозлучения антенны $T_{\text{аэ}}$ невелика и не превышает 0,2 К, однако наличие обтекателя приводит к увеличению эквивалентной температуры антенны примерно на 5–10 К.

Очевидно, что величина 1 % в данном случае будет равна эквивалентной шумовой температуре Земли, т. е. $T_{\text{я}} = T_{\text{з}} = 290$ К.

Следовательно, с учетом потерь в фидере, фильграх и неточности согласования фидеров суммарное значение эквивалентной температуры всех источников шумов, приведенных ко входу, будет значительно больше 290 К. В качестве примера в табл. 10 приведены шумовые характеристики современных малошумящих усилителей (МШУ), работающих в диапазоне частот 1–12 ГГц.

Шумовые характеристики современных МШУ

Тип МШУ	Эквивалентная шумовая температура, К		
	$f = 1$ ГГц	$f = 4$ ГГц	$f = 12$ ГГц
Охлаждаемый параметрический усилитель	25	30	70–100
Неохлаждаемый параметрический усилитель	40	50–60	100–150
Транзисторный параметрический усилитель	70–150	100–200	200–300

Сопоставив особенности различных электронных приборов, используемых в качестве входных усилителей сигналов БРТР, можно отметить, что при учете весовых характеристик, размеров и потребляемой мощности для этой цели наиболее пригодны широкополосные усилители на транзисторах, которые имеют достаточно малую температуру шумов и значительно проще квантовых усилителей.

6.2 Виды бортовых ретрансляторов и структура их построения

Принятый сигнал в бортовом приемнике может усиливаться как на СВЧ, так и на ПЧ. При выборе варианта усилителя следует учитывать, что уровень сигнала на входе приемника ретранслятора будет изменяться вследствие изменения расстояния между Землей и движущимися КА, а также некоторых нарушений ориентации антенн, изменения поглощения атмосферы и т. п. Кроме того, для уменьшения искажений при нелинейных преобразованиях сигналов в БРТР их количество стремятся сделать минимальным.

В зависимости от числа преобразований ретранслируемого сигнала на борту в настоящее время широкое применение находят в основном три типа БРТР: *гетеродинный, с однократным преобразованием частоты, с демодуляцией сигналов*. Последний тип БРТР иногда называют ретрансляторами с обработкой сигнала на борту.

Бортовой ретранслятор без демодуляции сигнала. Упрощенная структурная схема ствола БРТР с однократным преобразованием частоты приведена на рис. 16. Сигнал с центральной частотой $f_{\text{пр}}$, поступающий на вход БРТР от приемной антенны, появляется на выходе БРТР в полосе

частот передачи с центральной частотой $f_{\text{пер}}$ в результате однократного понижающего преобразования. Во избежание самовозбуждения БРТР выходная полоса частот значительно сдвигается относительно входной полосы.

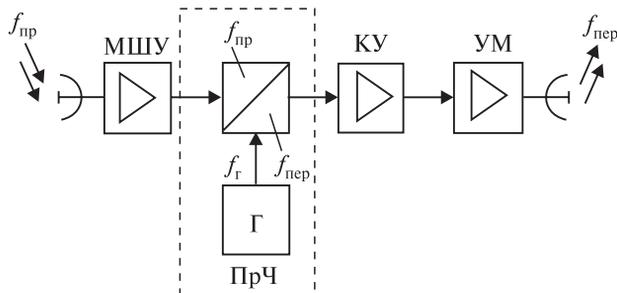


Рис. 16. Упрощенная структурная схема БРТР с однократным преобразованием частоты:

МШУ – малошумящий усилитель; ПрЧ – преобразователь частоты; КУ – каналный усилитель; УМ – усилитель мощности; Г – генератор

После предварительного усиления во входном малошумящем усилителе (МШУ) и сдвига по частоте в преобразователе частоты (ПрЧ) сигнал частоты $f_{\text{пр}}$ поступает на ствольный фильтр, в котором формируется заданная полоса пропускания ствола. Затем этот сигнал усиливается каналным усилителем (КУ) до уровня, необходимого для нормальной работы большого выходного каскада усилителя мощности (УМ). С выхода этого каскада сигнал поступает на передающую антенну.

Частота сдвига может быть различной в зависимости от используемых данной ССС полос частот. Так, например, в БРТР спутниковых систем Intelsat 5, Intelsat 6 частота приема составляет 6 ГГц, частота передачи – 4 ГГц, а частота сдвига – 2 ГГц соответственно. В некоторых ССС частота сдвига может быть порядка 750 МГц.

Коэффициент усиления ствола в большинстве ретрансляторов составляет 105–125 дБ. Поскольку на входной частоте реализовать большой коэффициент усиления технически сложно, его значение ограничивается пределами 40–45 дБ. Основное усиление сигнала происходит на выходной частоте и составляет 85–90 дБ. Значение коэффициента усиления сигнала на выходной частоте достаточно велико, и для того, чтобы избежать самовозбуждения тракта на выходной частоте, принимается ряд конструктивных мер, препятствующих возникновению режима самовозбуждения.

Для сокращения объема оборудования МШУ и ПрЧ делаются общими для группы стволов. Типичные полосы пропускания стволов фиксированной службы связи (ФСС) равны 36 и 72 МГц, а разнос центральных частот составляет 40 и 80 МГц соответственно.

БРТР гетеродинного типа. Упрощенная структурная схема ствола БРТР гетеродинного типа приведена на рис. 17. Принятый антенной сигнал на частоте $f_{\text{пр}}$ поступает на вход БРТР, предварительно усиливается МШУ и преобразуется в ПрЧ в сигнал промежуточной частоты (ПЧ). На частоте $f_{\text{пч}}$ в усилителе ПЧ (УПЧ) осуществляется основное усиление в заданной полосе частот, предварительно формируемой ствольным фильтром. В следующем ПрЧ осуществляется повышающее преобразование усиленного сигнала ПЧ в сигнал частоты передачи $f_{\text{пер}}$, который после дополнительного усиления в выходном мощном каскаде (УМ) излучается передающей антенной в сторону Земли.

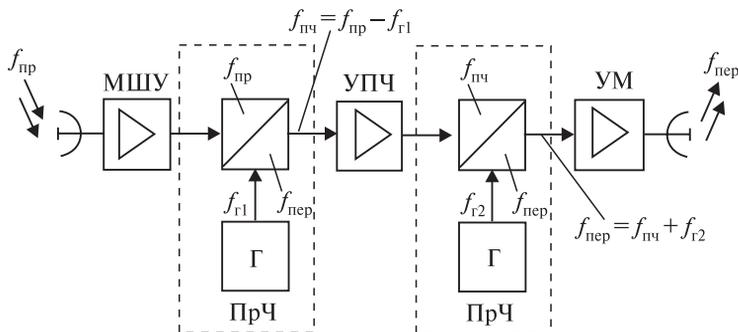


Рис. 17. Упрощенная структурная схема БРТР гетеродинного типа: МШУ – маломощный усилитель; ПрЧ – преобразователь частоты; КУ – каналный усилитель; УМ – усилитель мощности; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; Г – генератор

БРТР гетеродинного типа имеют полосу ствола порядка 40 МГц, и основное усиление обеспечивается в тракте промежуточной частоты, которую выбирают в пределах 70–120 МГц. Чаще всего гетеродинные БРТР имеют два преобразования частоты – понижающее, например, в стволе приема на линии ЗС – КА и повышающее в стволе передачи на линии КА – ЗС.

Такие схемы построения стволов использовались на начальных этапах развития спутниковых систем (спутники «Молния», «Радуга», «Экран», «Горизонт»), поскольку по состоянию развития техники в годы их разработок усилители с большим коэффициентом усиления (50–60 дБ) в бортовом исполнении можно было реализовать только на ПЧ.

Например один комплект одноствольного ретранслятора первого советского спутника связи «Молния-1» работал в диапазоне 800–1000 МГц и обеспечивал два режима: ретрансляцию сигналов одной телевизионной программы при $P_{\text{вых}} = 40$ Вт, а во втором режиме – дуплексную многоканальную связь при $P_{\text{вых}} = 14$ Вт. БРТР состоит из трех комплектов, один из которых является рабочим, а два других – резервными, что обеспечивает высокую надежность БРТР в целом.

В КА «Молния-1» прием и передачу осуществляют на одну антенну, причем тракты приема и передачи развязываются между собой с помощью поляризационного селектора и полосовых фильтров. Ствол БРТР содержал два приемника, в которых принятые на частотах $f_{\text{пр1}}$ и $f_{\text{пр2}}$ сигналы преобразуются в сигналы ПЧ, усиливаются УПЧ1 и УПЧ2.

Ограничители подавляют паразитную амплитудную модуляцию и стабилизируют уровень сигналов, так как входные сигналы могут изменяться при изменении условий распространения, условий полета КА, ориентации спутника и т. п. Далее с помощью второго гетеродина G_2 происходит повышающее преобразование частоты. Разность частот G_1 и G_2 определяет частоту сдвига. Для ИСЗ «Молния-1» эта разность составляет примерно 200 МГц, поскольку прием осуществляется в диапазоне 800 МГц, а передача – 1000 МГц. В предварительном усилителе (ПУ) сигналы обоих приемников объединяются и усиливаются (в качестве ПУ используется ЛБВ в линейном режиме). Окончательное усиление сигналов происходит в ЛБВ, работающей в режиме насыщения.

При передаче ТВ сигналов используют симплексный режим, при этом по команде с Земли один из приемников выключается, при реверсе ствола (изменении направления передачи) выключается первый, а включается второй.

При передаче телефонных (ТЛФ) сигналов на вход приемника поступают сигналы $f_{\text{пр1}}$ и $f_{\text{пр2}}$ от двух земных станций с частотной модуляцией (порядка 60 ТЛФ-каналами).

В последующих поколениях спутников типа «Молния» («Молния-2», «Молния-3»), а также спутников «Радуга», «Горизонт» БРТР стали многоствольными (от трех до шести стволов), а кроме того, повысился диапазон принимаемых и передающих частот (6 ГГц для приема и 4 ГГц для передачи), что позволило значительно увеличить ширину полосы трактов БРТР, т. е. повысить качество линии связи в целом.

БРТР с демодуляцией (обработкой) сигнала на борту. Обычно используют тогда, когда необходимо, например, перераспределить различные сигналы линии «вверх» по соответствующим усилителям и антеннам линии «вниз» (прием и передача по различным стволам), изменить способ или глубину модуляции на линии «вниз» по сравнению с линией

«вверх» и, если требуется, сформировать новый групповой сигнал на линии «вниз», например, вследствие наличия помехи на линии «вверх», искажающей информационное сообщение. Кроме того, операции регенерации сигналов на борту имеют смысл, когда по каким-то причинам стремятся уменьшить количество оборудования ЗС за счет усложнения бортовой аппаратуры.

Упрощенная схема такого БРТР представлена на рис. 18.

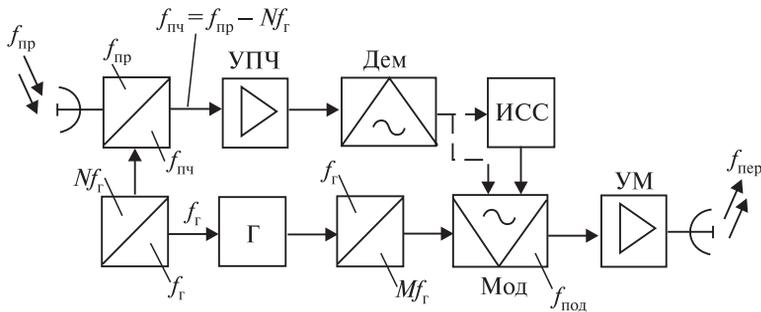


Рис. 18. Упрощенная структурная схема БРТР с демодуляцией сигнала гетеродинного типа:

УМ – усилитель мощности; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; Г – генератор; Дем – демодулятор; Мод – модулятор; ИСС – устройство изменения структуры сигнала

Здесь сигнал, принятый на частоте $f_{пр}$, преобразуется в сигнал промежуточной частоты $f_{пч}$, усиливается в тракте ПЧ (УПЧ) и демодулируется в демодуляторе (Дем). Демодулированный НЧ-сигнал поступает на модулятор (Мод) через устройство изменения структуры сигнала (ИСС) и далее через выходной усилитель мощности (УМ) в антенну. Принцип приведенного алгоритма обработки заключается в стремлении повысить эффективность передачи сигналов и систем связи, использующих бортовую ретрансляционную аппаратуру.

При МДЧР, т. е. при ретрансляции сигналов на множестве отдельных несущих, выходной усилитель работает со снижением мощности относительно насыщения на 3–6 дБ. Это позволяет уменьшить составляющие интермодуляционных искажений и обеспечить ретрансляцию сигналов с заданным качеством.

При МДВР мощный каскад ствола БРТР работает практически в режиме максимальной мощности. Поэтому целесообразно для эффективного использования ресурсов КА на линии КА – Земля применять режим МДВР.

Бортовой ретранслятор с демодуляцией (обработкой) на борту позволяет улучшить системные показатели ССС:

- повышается помехоустойчивость линии Земля – КА за счет регенерации сигнала на борту;
- оптимально расходуется энергия бортового источника питания за счет работы передатчика в режиме максимальной мощности;
- повышается помехоустойчивость на линии КА – Земля из-за излучения БРТР радиосигналов с максимально возможной мощностью.

К недостаткам таких БРТР относятся существенное усложнение аппаратуры стволов и ограничения на типы используемых сигналов конкретным видом модуляции, реализованным в БРТР.

Структурная схема БРТР при работе радиолинии Земля – КА – Земля в режиме МДВР с регенерацией сигналов представлена на рис. 19. Принятые антенной БРТР последовательные пакеты сигналов от различных ЗС для регенератора некогерентны, хотя их несущие и тактовые частоты мало отличаются друг от друга. Таким образом, для регенератора модулирующих сигналов должны быть восстановлены несущие и тактовые частоты всех пакетов.

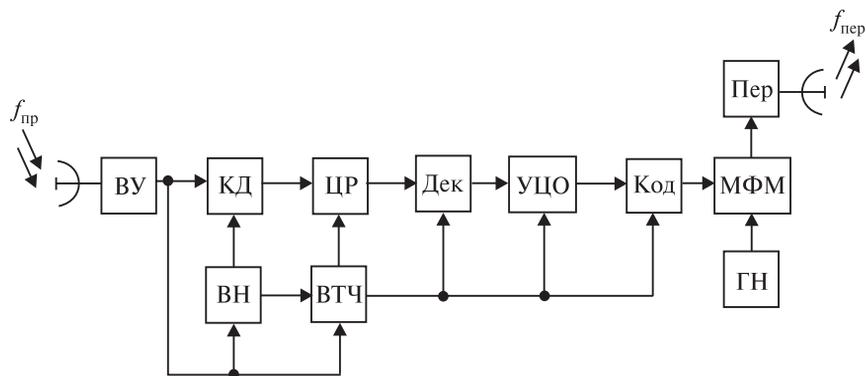


Рис. 19. Упрощенная структурная схема БРТР с регенерацией сигнала:
ВУ – входной усилитель; КД – устройство когерентного детектирования;
ЦР – схема цифрового решения; ВН – устройство восстановления несущей;
ВТЧ – устройство восстановления тактовой частоты; Дек – декодер ОФМ/ФМ;
УЦО – устройство цифровой обработки потока данных; Код – кодер ОФМ;
ГН – генератор несущей; МФМ – фазовый модулятор; Пер – передатчик

Бортовой ретранслятор с регенератором в общем случае при обработке ФМ-сигнала должен выполнять следующие функции:

- когерентное детектирование (КД) с помощью восстановленной несущей (ВН);

- восстановление тактовой частоты (ВТЧ);
- цифровое решение (ЦР);
- преобразование относительной фазы в абсолютную (декодирование ОФМ/ФМ);
- цифровую обработку потока данных;
- обратное преобразование абсолютной фазы в относительную (кодирование);
- формирование несущей частоты (ГН) и фазовую модуляцию (ФМ).

Если БРТР выполняет все данные функции, то трудно найти компромисс между этими условиями и необходимостью одновременного обеспечения малой массы, потребления, высокой надежности и т. п. Особенно трудновыполнимыми оказываются быстродействующие устройства ВН и ВТЧ.

Исключение некоторых элементов регенератора упрощает БРТР. Например, реализация устройств ВН, работающих с высокой стабильностью, крайне сложная задача. В связи с этим ВН исключают из схемы БРТР и заменяют автокорреляционным детектором (АД) ОФМ, что упрощает БРТР и повышает надежность, хотя несколько ухудшает его энергетические возможности (приблизительно на 0,5; 2,5; 3 дБ соответственно для двух-, четырех- и восьмифазового сигнала) по сравнению с КД. Однако, когда достоверность принимаемой информации определяется в основном участком КА – Земля, использование АД на борту практически не ухудшает общей достоверности.

В *многоствольных ретрансляторах* в целях сокращения бортовой аппаратуры стремятся создать общие блоки усиления для нескольких стволов. Пример схемы бортового оборудования, рассчитанного на передачу пяти стволов, показан на рис. 20.

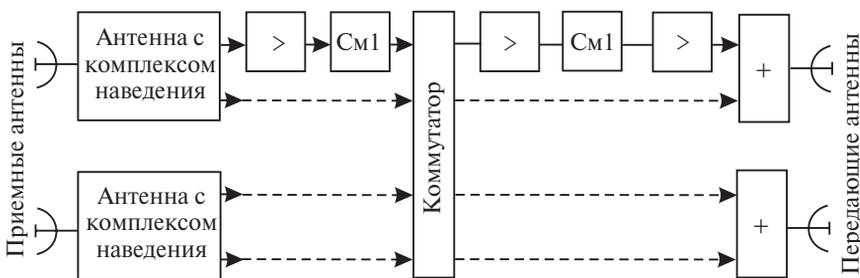


Рис. 20. Многоствольный ретранслятор

Основное усиление в каждом стволе осуществляется сравнительно узкополосным УПЧ на разных промежуточных частотах, а затем, после ограничения и смещения в область СВЧ, все стволы объединяются для

последующего усиления с помощью ЛБВ. В УПЧ каждого ствола имеется ограничитель амплитуды и система АРУ.

Необходимо еще раз отметить, что одновременное прохождение сигналов нескольких стволов через общий усилитель, характеристики которого всегда имеют некоторую нелинейность, будет приводить к появлению переходных шумов. В частности, при одновременном усилении нескольких стволов общей ЛБВ вследствие нелинейности амплитудной и фазовой характеристик между стволами возникнут переходные невнятные шумы. При наличии паразитной амплитудной модуляции хотя бы в одном из стволов с частотной модуляцией (ЧМ) нелинейность фазово-амплитудной характеристики ЛБВ приведет к появлению внятных переходных шумов.

Уровень как невнятных, так и внятных переходных шумов зависит от режима работы ЛБВ и мощности сигналов на ее входе. Поэтому при одновременном усилении сигналов нескольких стволов общими усилителями на ЛБВ или других приборах расчетная величина шумов ретранслятора должна быть увеличена. Поскольку суммарное значение шумов на выходе канала определяется рекомендациями МККР и остается неизменным, то отмеченное увеличение шумов ретранслятора приведет к необходимости уменьшить тепловые шумы на участках Земля – КА и КА – Земля.

Последнее возможно только при увеличении мощности, излучаемой передающей станцией. На основе этого можно сделать вывод, что использование в ретрансляторе блоков, в которых осуществляется одновременное усиление нескольких стволов, требует увеличения мощности бортового и земного передатчика или повышения коэффициента усиления передающих антенн.

Кроме того, одновременное усиление сигналов нескольких стволов приводит к непропорциональному росту номинальной выходной мощности выходного каскада, так как вследствие нелинейности амплитудной характеристики выходная мощность передатчика должна быть больше суммы мощностей отдельных стволов. Величина этого различия определяется числом стволов и степенью нелинейности амплитудных характеристик выходного каскада.

Межлучевая коммутация. Организация 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 осуществляться по частоте, по времени или обоим признакам одновременно. Возможно также кодовое разделение. Разделение можно выполнять до отдельных абонентских каналов или

до групп каналов. Второй вариант более экономичный по аппаратурным затратам, но проигрывает первому по степени полезной загрузки каналов связи, особенно в тех случаях, когда перераспределение сигналов выполняется с помощью фиксированных связей (статическая коммутация).

Перераспределение каналов может быть осуществлено по радио- или видеочастоте. Процесс организации межлучевых фиксированных связей по радиочастоте иллюстрирует рис. 21.

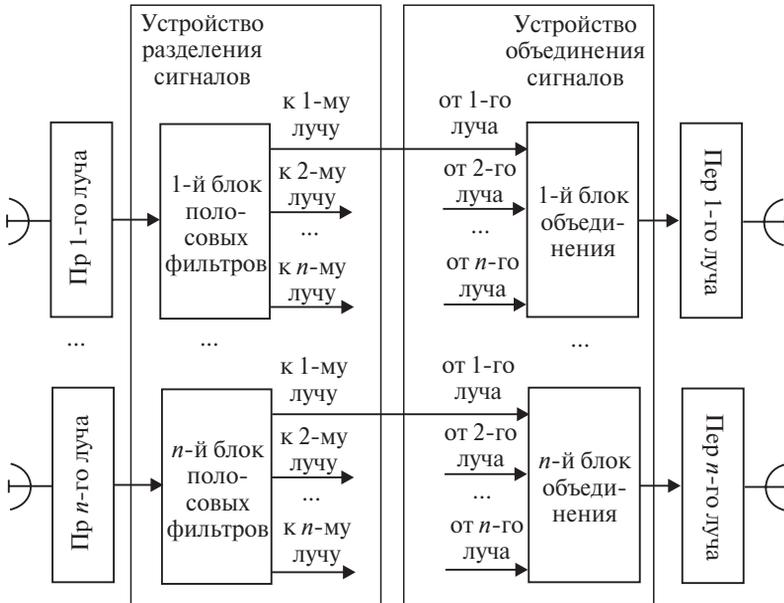


Рис. 21. Организация межлучевых связей:
Пер – передатчик; Пр – приемник

При МДЧР устройствами разделения являются входные мультиплексоры, при МДВР – схемы выделения пакетов из кадра.

Недостаток схем коммутации с фиксированными связями – это отсутствие возможности отслеживания каких-либо изменений трафика, что снижает пропускную способность БРТК. Для отслеживания медленных изменений трафика по направлениям при МДЧР можно использовать коммутатор с трансформацией межлучевых связей по направлениям. Его включают между схемами разделения и объединения сигналов. Этот коммутатор называют статическим, поскольку переключение цепей осуществляется только для трансформации межлучевых связей, а в про-

межутках коммутатор находится в статическом состоянии. Устройство разделения сигналов должно быть оснащено фильтрами с различной шириной полосы пропускания.

Высокую (почти 100 %) загрузку каналов можно реализовать при осуществлении коммутации в видеоспектре. В этом случае на борту ИСЗ необходима демодуляция всех коммутируемых сигналов, что связано со значительными аппаратными затратами. Коммутацию можно осуществить по следующему алгоритму: сигналы со всех выходов демодуляторов уплотняются во времени и объединяются в единый поток, а затем разделяются по направлениям с использованием цифровых запоминающих устройств. Это позволяет изменять временное положение коммутируемых пакетов, чего нельзя реализовать на радиочастоте.

7. ЗЕМНЫЕ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Станции магистральной спутниковой связи. Структурная схема типовой многоствольной приемо-передающей ЗС приведена на рис. 22. Станция содержит приемо-передающую антенну; фидерный тракт с устройствами разделения приема и передачи; приемный тракт, который включает малошумящий усилитель; устройство распределения энергии сигнала; преобразователь частоты вниз и приемную часть аппаратуры каналообразования; тракт передачи в составе передающей части аппаратуры каналообразования и передающих устройств, а также системы электропитания, контроля и управления.

Станции систем подвижной спутниковой связи. Системы подвижной спутниковой связи (ПСС) предназначены для организации связи между абонентами наземных сетей общего пользования и подвижными терминалами, устанавливаемыми на подвижных объектах, например морских и речных судах, самолетах, автомобилях, железнодорожных поездах и т. д.

Абонентские станции. Наиболее важным элементом любой системы ПСС являются абонентские станции, поскольку именно эти станции устанавливаются на подвижных средствах и именно к ним предъявляются наиболее жесткие требования, вытекающие из особенностей их использования. Эти станции должны обладать:

- максимальной помехоустойчивостью;
- минимальными габаритными размерами и массой;
- минимальным энергопотреблением при максимальном КПД;

- достаточной для данного класса станций механической прочностью;
- высоким уровнем автоматизации, практически исключая вмешательство оператора в процесс установления связи.

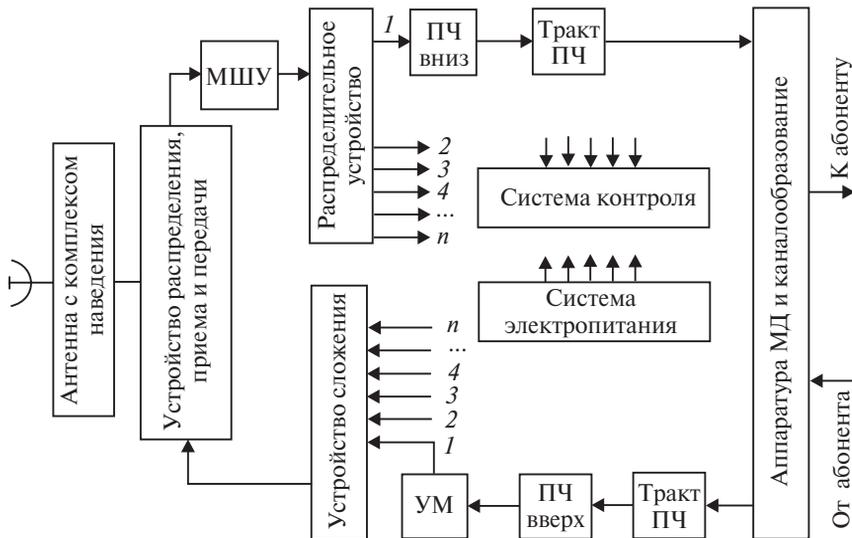


Рис. 22. Структурная схема типовой многоканальной приемно-передающей ЗС: МШУ – малозумящий усилитель; МД – многостанционный доступ

Каждая разновидность абонентских станций реализует определенный набор услуг (так называемый стандарт). Выбор стандарта накладывает условие на электрические параметры станции, характеристики канала связи, используемые протоколы многостанционного доступа и т. д. Обобщенная структурная схема абонентской станции системы ПСС Inmarsat приведена на рис. 23.

В состав любой абонентской станции входят: приемно-передающее оборудование (включая антенную систему, малозумящий усилитель, усилитель мощности, понижающий и повышающий преобразователи и формирователь опорной частоты); каналообразующая аппаратура (включая синтезатор частот, преобразователи частоты приема и передачи, демодулятор и модулятор); тракт цифровой обработки сигналов (включая скремблер-дескремблер, кодек исправления ошибок, кодек телефонного канала, устройства синхронизации); управляющий процессор и внешнее оборудование (телефонное оборудование, факсимиле и т. д.).

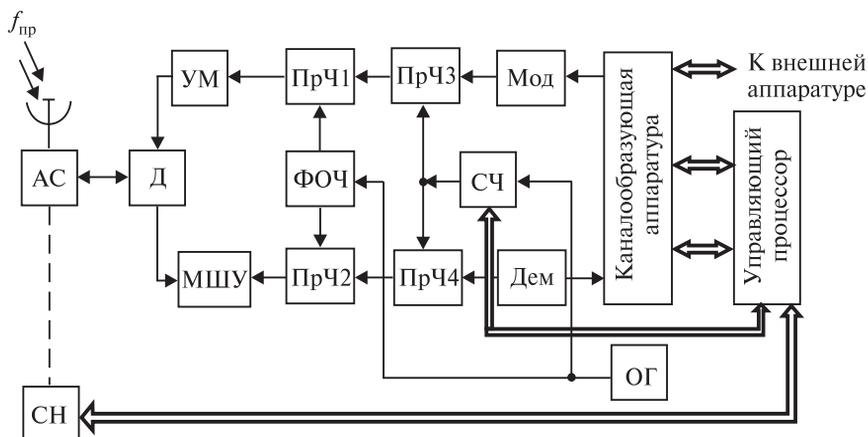


Рис. 23. Обобщенная структурная схема абонентской станции ПСС Inmarsat:
 АС – антенная система; Д – дуплексор; МШУ – малошумящий усилитель;
 ОГ – опорный генератор; ПрЧ – преобразователь частоты; СН – система наведе-
 ния; СЧ – синтезатор частоты; УМ – усилитель мощности; ФОЧ – формирователь
 опорных частот; <=> – цифровой сигнал; <-> – аналоговый сигнал

Каждая абонентская станция осуществляет постоянный прием сигналов в общем канале сигнализации на частоте, жестко закрепленной за спутниковой сетью. При приеме сигнального сообщения, относящегося к этой абонентской станции и определяемого по идентификационному номеру (закрепляемому индивидуально за каждой станцией), управляющий процессор станции производит расшифровку сообщения и вырабатывает команды в соответствии с алгоритмом работы системы.

Стационарные станции. Основное назначение стационарных станций – прием и передача сигналов от абонентских станций, устанавливаемых на подвижных средствах или в удаленных районах, обработка этих сигналов в соответствии с принципами формирования сигналов и протоколами информационного обмена, принятыми в системе связи, использующей данную станцию, а также сопряжение с наземными телефонными сетями (или сетями передачи данных) общего пользования, ведомственными и выделенными коммутируемыми и некоммутируемыми наземными телефонными сетями и сетями передачи данных.

Стационарная станция является центром коммутации наземных каналов связи (цифровых или аналоговых) и спутниковых каналов. Помимо этого, стационарные станции осуществляют прием сигнальной или служебной информации от абонентских станций и станций управления сетью и обработку этой информации для управления работой аба-

нентских станций в соответствии с принципами формирования сигналов и протоколами информационного обмена, принятыми в системе связи, использующей данную станцию, а также передачу сигнальной и служебной информации к абонентским станциям и станциям управления сетью.

Требования к стационарным станциям определяются характеристиками используемого в данной системе спутника-ретранслятора и типами абонентских станций. Характеристики спутника-ретранслятора определяют диапазон рабочих частот, энергетические характеристики станции, а следовательно, и типы используемых антенных систем. Типы используемых абонентских станций определяют состав канального оборудования, параметры каналов и методы многостанционного доступа. В табл. 11 приведены основные характеристики стационарных станций действующей системы ПСС Inmarsat.

Таблица 11

Основные характеристики стационарных станций действующей системы ПСС Inmarsat

Параметры стационарной ПСС Inmarsat	Значение
Диапазон частот, ГГц	4/6
Диаметр антенной системы, м	12
Уровень боковых лепестков, $1^\circ < Q < 48^\circ$	32–251gQ
G/T , дБ/К	32
Максимальная ЭИИМ, дБ · Вт	72
При числе каналов, не более	16
Служба	Морская + Сухопутная

Станции управления сетью. Станция управления сетью (СУС) предназначена для управления всеми станциями системы ПСС, располагающимися в зоне обслуживания спутника-ретранслятора данной системы, и распределения энергетического и частотного ресурсов бортового ретранслятора между стационарной и абонентскими станциями, функционирующими в сети.

Существует два варианта построения СУС. В первом варианте СУС является отдельной подсистемой, дополняющей «стандартную» связную стационарную станцию. В этом случае станция называется центральной спутниковой станцией (ЦСС). Во втором случае СУС – отдельная станция, состоящая из приема-передающего комплекса (характеристики

которого аналогичны характеристикам одноименного комплекса связной стационарной станции), комплекса каналообразующей аппаратуры, управляющего комплекса. Отличие комплекса каналообразующей аппаратуры от аналогичного комплекса связной станции заключается в том, что это устройство осуществляет обработку информации, передаваемой только по каналам сигнализации.

8. СЕТИ СТАНЦИЙ VSAT

К классу земных станций VSAT (Very Small Aperture Terminal) относятся станции спутниковой связи, технические характеристики которых удовлетворяют следующим требованиям:

- станции VSAT устанавливаются непосредственно у пользователей, причем плотность размещения их на ограниченной территории может быть весьма высокой;

- станции VSAT обычно не имеют постоянного квалифицированного обслуживающего персонала;

- контроль и управление работой станций VSAT в сети осуществляются централизованно, но могут дополнительно использоваться и местные станционные системы контроля и управления;

- станции VSAT относятся к фиксированной спутниковой службе (ФСС) и должны удовлетворять тем же требованиям, что и все земные станции ФСС;

- станции VSAT обычно применяются в так называемых выделенных сетях (частных, деловых) для передачи данных и телефонии в цифровом виде в режимах работы только на прием или на прием/передачу;

- антенны VSAT обычно имеют диаметр 1,8–3,5 м, но в отдельных системах могут использоваться и большие антенны (диаметром до 6 м);

- скорость передачи информации в цифровом виде со станций VSAT обычно не превышает 2 Мбит/с;

- в станциях VSAT используется маломощный радиопередатчик (обычно от 1 до 20 Вт) с обязательным ограничением излучаемой мощности в целях безопасности.

Сети станций VSAT чаще всего работают в настоящее время в диапазонах частот ФСС 6/4 ГГц и 14/11–12 ГГц.

Сети VSAT принято классифицировать по двум основным признакам: конфигурации трафика и структуре системы управления сетью (централизованная и децентрализованная).

По конфигурации трафика существует три основных варианта организации связей в сетях VSAT, как это показано на рис. 24:

- сеть типа «точка – точка» – простейший случай дуплексной линии связи между двумя удаленными станциями;
- сеть типа «звезда» – для многонаправленного радиального трафика между центром сети и периферийными (удаленными) пунктами связи;
- сеть типа «каждый с каждым» (сеть типа MESH в англоязычной литературе) – для прямых связей между любыми пунктами сети связи.

Сеть типа «точка – точка», представленная на рис. 24, а, позволяет обеспечить прямую дуплексную связь между двумя удаленными пунктами связи. Такая схема связи наиболее эффективна при больших расстояниях между пунктами или их расположении в труднодоступных регионах.

В наиболее распространенной для станций класса VSAT сети типа «звезда», представленной на рис. 24, б, обеспечивается многонаправленный радиальный трафик между центральной земной станцией сети (ЦЗС) и удаленными периферийными станциями (терминалами) VSAT по энергетически выгодной схеме: малая земная станция VSAT – большая ЦЗС, обладающая антенной большого диаметра и мощным передатчиком.

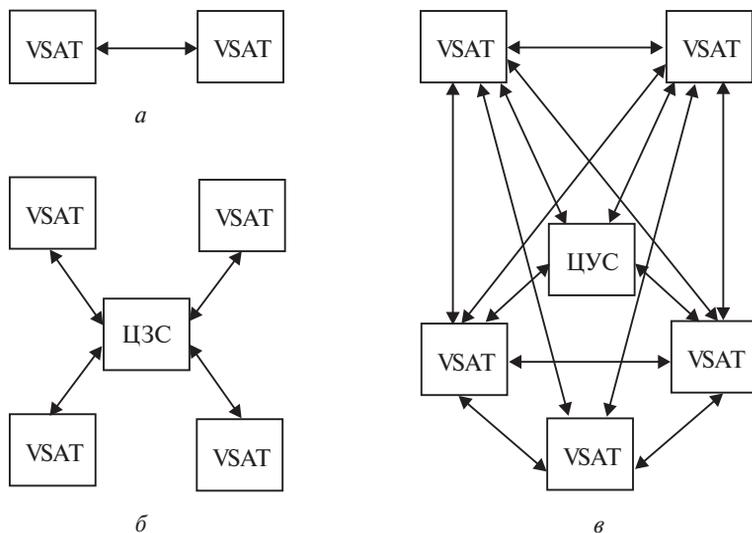


Рис. 24. Типы сетей VSAT:

а – «точка – точка»; б – «звезда»; в – «каждый с каждым»; ЦЗС – центральная ЗС;
ЦУС – центральная управляющая станция

Сети VSAT подобного рода широко используются для организации информационного обмена между большим числом удаленных терминалов, не имеющих взаимного трафика, и центральным офисом фирмы, транспортными или финансовыми учреждениями.

Аналогичным образом построены телефонные сети для обслуживания так называемых удаленных абонентов, которым обеспечивается выход на телефонную коммутируемую сеть общего пользования через центральную станцию, подключенную к одному из наземных центров коммутации каналов (GATEWAY).

Функции контроля и управления в сети типа «звезда» (рис.24, в) обычно централизованы и сосредоточены на центральной управляющей станции (ЦУС) сети (в англоязычной литературе – HUB station). Центральная управляющая станция выполняет служебные функции установления соединений между абонентами сети связи и поддержания рабочего состояния всех периферийных терминалов VSAT данной сети. Подобная централизованная система управления сетью VSAT с помощью ЦУС экономически целесообразна для сетей с достаточно большим числом упрощенных и потому дешевых периферийных терминалов VSAT. Однако известны примеры реализации сетей VSAT без ЦУС с децентрализованной распределенной системой управления, элементы которой входят в состав каждой станции VSAT.

В сети «каждый с каждым» (рис.24, в) обеспечиваются прямые соединения между любыми станциями VSAT, расположенными во всех пунктах связи. Связь двух любых станций в такой сети устанавливается через спутник за один «скачок». Схема оптимальна для телефонных сетей, создаваемых в труднодоступных и удаленных районах, и для сетей передачи данных с относительно небольшим числом удаленных терминалов VSAT.

При централизованной схеме управления такой сетью ЦУС выполняет только служебные функции контроля и управления, необходимые для установления соединения между абонентами сети VSAT, но не участвует в передаче трафика. В децентрализованном варианте управления сетью ЦУС отсутствует, а элементы системы управления входят в состав каждой станции VSAT. Подобные сети с распределенной системой управления отличаются повышенной «живучестью» и гибкостью за счет усложнения оборудования, расширения его функциональных возможностей и удорожания по этим причинам терминалов VSAT.

Многостанционный доступ в сетях VSAT обычно организуется на основе метода МДЧР в режиме закрепленных каналов между станциями с интенсивным трафиком или в режиме МДЧР с предоставлением кана-

лов по требованию (МДЧР-ПКТ) для интерактивного трафика. В интерактивном режиме передачи информации станции сети VSAT осуществляют доступ к выделенным в стволе ретранслятора несущим на основе метода МДВР, в том числе по протоколу МДВР со случайным доступом типа АЛОНА или более эффективным разновидностям этого протокола: тактированная АЛОНА (S-АЛОНА) и АЛОНА с резервированием (R-АЛОНА).

Как показано на рис. 25, в сетях типа «звезда» различают исходящие (ЦЗС – VSAT) и входящие (VSAT – ЦЗС) спутниковые каналы, которые образуются на основе МДЧР в выделенной для данной сети VSAT полосе частот ствола спутникового ретранслятора.

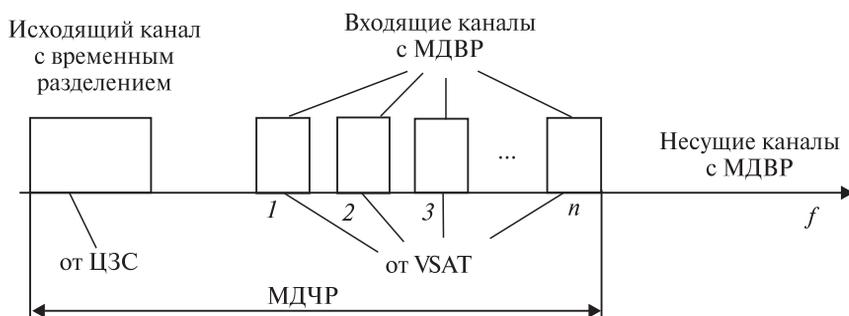


Рис. 25. Многостанционный доступ в сетях VSAT типа «звезда»

В сетях VSAT с большим числом периферийных терминалов каждому исходящему каналу ЦЗС обычно соответствует несколько (1, 2, ..., n) входящих каналов ($n < 32$), используемых различными группами терминалов VSAT. Структура входящих и исходящих каналов в каждом конкретном случае определяется на основе требований к сети связи, составу сети, видам и скорости передаваемой информации. В одной сети может быть организовано несколько исходящих и соответствующих им входящих каналов.

Исходящий канал ЦЗС – VSAT организуется обычно как канал на отдельной несущей с временным разделением (ВР) и пакетированием передаваемой информации. Скорость передачи информации в исходящем канале определяется общим объемом радиального трафика от ЦЗС сети к группе обслуживаемых периферийных терминалов VSAT. Типовые скорости передачи информации в исходящих каналах действующих сетей VSAT составляют 256–2048 кбит/с, метод модуляции – двукратная фазовая манипуляция (ДФМ/QPSK).

Центральная станция передает информацию в исходящем канале в виде непрерывного сигнала с регулярной кадровой структурой, состоящего из временной последовательности информационных пакетов, повторяющих классическую структуру пакетов систем с МДВР:

- флаг начала пакета (преамбула);
- заголовок пакета;
- блок данных (полезная информация);
- проверочная последовательность (исправление ошибок);
- флаг окончания пакета (постамбула).

Границы кадра обозначаются уникальным словом (UW) и блоком служебной информации, которые используются для сетевой кадровой синхронизации пакетов, передаваемых терминалами VSAT во входящих каналах VSAT – ЦЗС.

Совокупность передаваемых в исходящем канале ЦЗС пакетов предназначена (адресуется) группе периферийных терминалов VSAT. Каждый терминал VSAT по коду адресного поля в заголовке пакетов принимает только адресованные этому терминалу пакеты из переданной последовательности. Другие пакеты пропускаются (игнорируются).

В каждом из ответных входящих каналов VSAT – ЦЗС, передаваемых на отдельных несущих, организуется временной доступ группы терминалов VSAT с передачей информации пакетами со следующей структурой:

- преамбула;
- заголовок;
- информационный блок;
- проверочная последовательность;
- постамбула.

Пакеты разных станций VSAT располагаются на временных интервалах в пределах общего временного кадра. Для доступа наиболее часто используются разновидности одного из протоколов МДВР со случайным доступом типа S-ALOHA, R-ALOHA или более эффективных протоколов, адаптивных к значению загрузки канала. Типовые скорости передачи пакетированной информации во входящих каналах составляют 64/128 кбит/с, модуляция – ФМ-2/ФМ-4 (BPSK/QPSK).

В ряде случаев применяется МДКР, позволяющий наиболее эффективно решать проблему электромагнитной совместимости сетей VSAT с наземными и другими спутниковыми сетями, но уступающий МДВР по эффективности использования пропускной способности спутникового ретранслятора.

В настоящее время применяются как сети VSAT для передачи отдельных видов информации (телефонные сети, сети передачи данных), так и интегрированные сети «деловой» спутниковой связи, обеспечива-

ющие пользователям комплекс услуг по передаче с каждого терминала VSAT различных видов информации в цифровой форме (данных, речевых сообщений, сигналов факса и телекса). В этом случае для передачи каждого вида информации могут быть использованы наиболее эффективные из вышеперечисленных методов доступа терминала VSAT к спутниковому сегменту, которые обеспечивают оптимальные задержки передачи информации между абонентами сети для интерактивных режимов работы, передачи больших файлов данных или комбинированных вариантов трафика.

9. СИСТЕМЫ ПЕРСОНАЛЬНОЙ ПОДВИЖНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Персональная радиосвязь на базе спутников на низких орбитах – одно из быстро развивающихся направлений связи. Применение радиосвязи на абонентском участке позволяет обеспечить доступ к каналу связи при перемещении в пространстве. Примером такой персональной радиосвязи может служить система спутниковой мобильной связи Iridium. Схема орбитальной группировки системы Iridium показана на рис. 26.

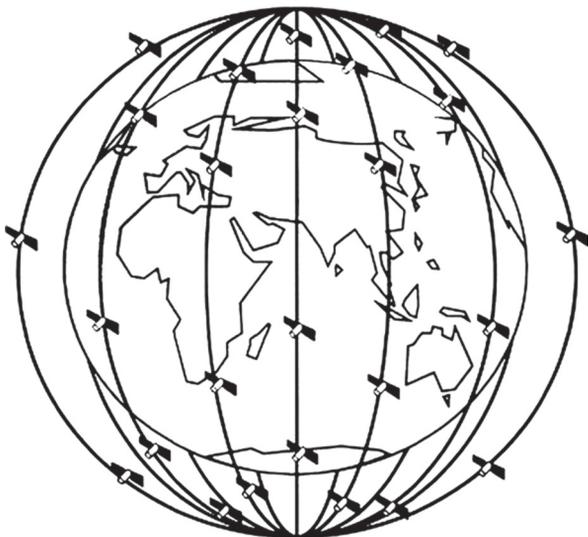


Рис. 26. Схема орбитальной группировки системы Iridium

Космический сегмент состоит из некоторого числа спутников, находящихся на негеостационарных орбитах. Спутники размещаются по несколько штук в некоторой плоскости (плане) таким образом, что, двигаясь в заданных плоскостях и последовательно сменяя друг друга, формируют заданную зону обслуживания. Требуемая зона обслуживания создается узкими лучами антенных систем отдельных спутников, находящихся в различных орбитальных плоскостях.

Основными типами негеостационарных орбит, используемых в системах персональной связи, являются:

- низкие земные орбиты (LEO) высотой 700–1500 км;
- промежуточные круговые орбиты (MEO) высотой около 10 000 км.

В наземный сегмент системы включаются:

- станции сопряжения (СС), обеспечивающие взаимодействие системы с наземными сетями общего пользования (НСОП) при применении для каждой страны или региона конкретных систем нумерации и видов сигнализации;

- станции управления КА-ретрансляторами, включая станции управления сетью связи, а также станции телеметрии и передачи команд управления.

Параметры основных систем на низкоорбитальных спутниках приведены в табл. 12.

Таблица 12

Параметры основных систем на низкоорбитальных спутниках

Параметры системы	Iridium	Globalstar	«Сигнал»	«Гонец»
Количество КА	66	48	48	45
Количество орбитальных плоскостей / число КА в плоскости	6/11	8/6	8/6	5/9
Тип орбиты	LEO	LEO	LEO	LEO
Высота орбиты, км	780	1389	1500	1400
Наклонение, град.	86	52	74	83
Масса КА, кг (на орбите/стартовая)	317/689	250/450	300	225
Зона обслуживания, град. (с.ш. / ю.ш.)	0–90	0–72	27–90	0–90
Предоставляемые услуги	ТЛФ, ПД	ТЛФ, ПД	ТЛФ, ПД	ПД, ТЛФ

Параметры системы	Iridium	Globalstar	«Сигнал»	«Гонец»
Суммарная мощность передатчиков в направлении КА – АС, Вт	120	1000	150	40
Количество лучей	48	16	11	1
Количество каналов на КА	2500	2600	220	–
Метод доступа абонентов	МДВР- МДЧР МДПР	МДКР- МДЧР МДПР	МДКР- МДЧР	МДЧР МДВР
Способ связи между зонами	Межспутниковый	Через СС	Через СС	Перенос, память на спутнике
Количество СС	25	200	6	–

Для организации доступа абонентов в систему связи используют достаточно сложное сочетание нескольких видов многостанционного доступа:

- многостанционный доступ с пространственным разделением (МДПР), организуемый за счет использования узких лучей, формируемых на КА;
- многостанционный доступ с временным разделением, используемый в отдельном луче (cote), – система Iridium;
- многостанционный доступ с кодовым разделением, используемый в каждом луче (cote), – системы Globalstar, «Сигнал»;
- многостанционный доступ с частотным разделением, используемый для смежных лучей (cot), – системы Iridium, Globalstar, «Сигнал».

Одной из основных проблем, возникающих при разработке систем персональной спутниковой связи, является организация соединений между абонентскими станциями, находящимися в зонах, формируемых различными КА.

В настоящее время эта задача решается двумя способами.

1. Использование межспутниковой связи, что характерно для системы Iridium (рис. 27).

Каждый КА имеет радиолинии связи с двумя КА, находящимися в той же орбитальной плоскости, и с двумя КА в соседних орбитальных плоскостях. Сегмент управления сетью связи сообщает центральному

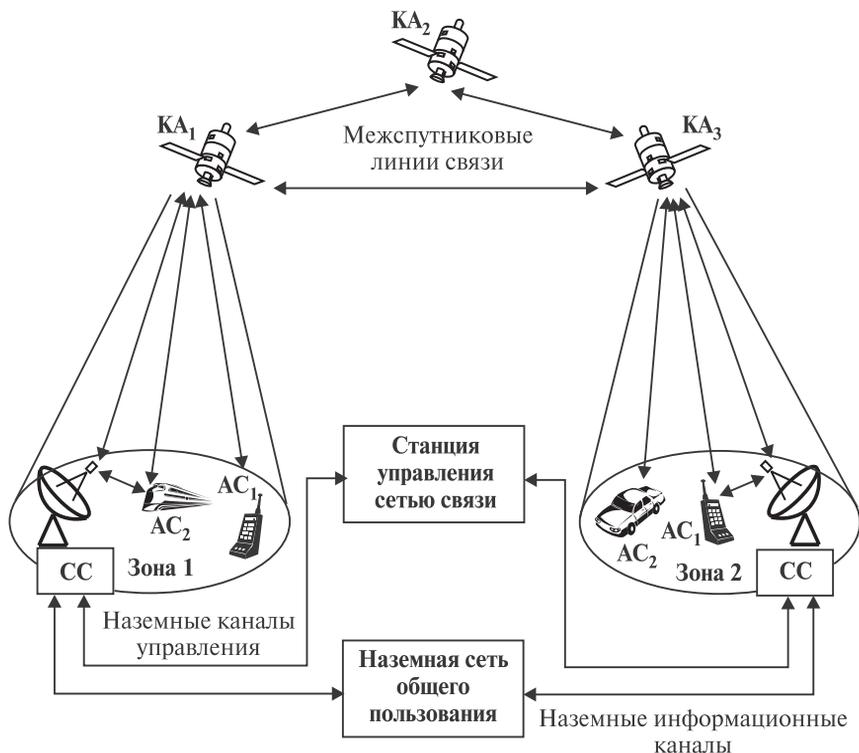


Рис. 27. Система с межспутниковыми связями:
 СС – станция сопряжения; АС – абонентская станция

процессору (ЦП) управления КА информацию о положении абонентской станции в той или иной зоне. ЦП выбирает необходимый маршрут прохождения информации по соответствующему межспутниковому каналу связи. Поэтому для сопряжения с наземными линиями связи требуется ограниченное количество СС. Для линий межспутниковой связи применяются следящие антенные системы.

2. Использование наземных каналов связи между СС, находящимися в каждой зоне, что характерно для системы Globalstar, «Сигнал» (рис. 28).

Сигнал вызова (или информационный сигнал) от абонентской станции (АС) через КА поступает на СС данной зоны. Поскольку в банке данных СС хранится информация о зоне, в которой расположена вызываемая абонентская станция, СС организует прохождение вызывного (или

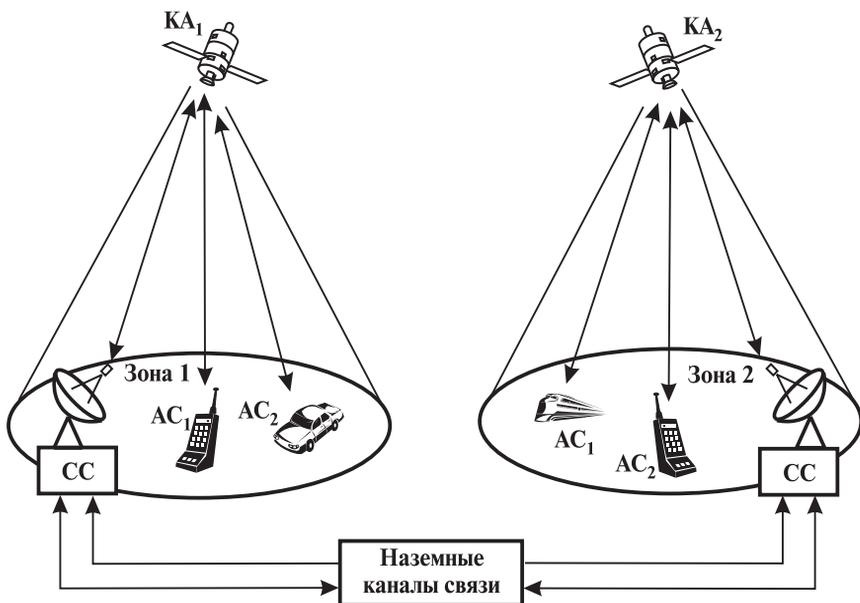


Рис. 28. Система с использованием наземных каналов связи:
 СС – станция сопряжения; АС – абонентская станция

информационного) сигнала к соответствующей СС по наземным каналам связи.

Наиболее простой системой персональной спутниковой связи является система «Гонец». Она предназначена для нескольких режимов передачи сообщений в зависимости от их объема и типа. При нахождении абонентов в зоне видимости одного КА обмен информацией (в том числе и телефонной) осуществляется в реальном масштабе времени. Если вызывающая и вызываемая абонентские станции находятся в зонах радиовидимости различных КА, возможна передача сообщений только в режиме электронной почты – с запоминанием, хранением сообщений на борту КА и их передачей к вызываемой абонентской станции при пролете КА над регионом ее расположения.

Персональная спутниковая связь – важнейший элемент мобильных систем третьего поколения, поскольку обладает многими архитектурными и технологическими возможностями, например, такими как мультирегиональный и глобальный охват обслуживаемой территории, обеспечивающий универсальное решение задачи роуминга и доступа пользователей в удаленных и малонаселенных районах к услугам связи.

9.1. Низкоорбитальная система связи Iridium

Система Iridium (англ. *Iridium*, от лат. *Iridium* – иридий) относится к классу низкоскоростных персональных систем радиотелефонной связи, ее отличительными особенностями являются совместимость с наземными сетями сотовой радиотелефонной связи, предоставление полного набора услуг (наряду с радиотелефонной связью), обеспечиваемых системами класса LEO, возможность круглосуточной связи в любое время суток в режиме реального времени, наличие корректируемой орбитальной группировки, которая обеспечивает глобальное покрытие земной поверхности без мертвых зон в наиболее обжитых районах мира.

Свое название система получила в связи с тем, что первоначально планировалось создать группировку из 77 спутников. Это число равно атомному номеру иридия. Акции корпорации Iridium Communications Inc., образованной в результате слияния GHL Aquisition Corp. и Iridium Holdings LLC в сентябре 2009 г., продаются на бирже NASDAQ. На конец 2009 г. сеть Iridium насчитывала около 400 000 абонентов, в число которых вошли сотрудники крупных мировых корпораций, работающих в сфере добычи полезных ископаемых, морского, наземного и воздушного транспорта, строительства, туризма, других отраслях, а также в службах спасения и экстренной помощи. Одним из крупнейших пользователей сети является правительство США.

С системой Iridium связан интересный факт: первое и единственное столкновение спутников на околоземной орбите произошло 10 февраля 2009 г. Спутник Iridium 33 столкнулся с отработавшим ресурс и выведенным из эксплуатации спутником связи «Космос-2251» (серия «Космос»).

Система является международной, и для предоставления и реализации ее услуг на территории России и стран СНГ в 2009 г. создана дочерняя компания Iridium Russia (ООО «Иридиум Коммьюникейшнс»).

Состав и структура системы. В состав системы Iridium входят пять сегментов: космический, наземный сегмент управления системой; сегмент станций сопряжения, пользовательский сегмент и средства вывода спутников на орбиту. Структура системы Iridium показана на рис. 29.

Наземная инфраструктура управления системой включает в себя основной и резервный центры управления, а также земные станции, предназначенные для передачи команд и телеметрической информации. Средства центра управления обеспечивают контроль функционирования каждого КА и всей системы Iridium в целом. Системой управляют два территориально разнесенных центра управления, находящихся

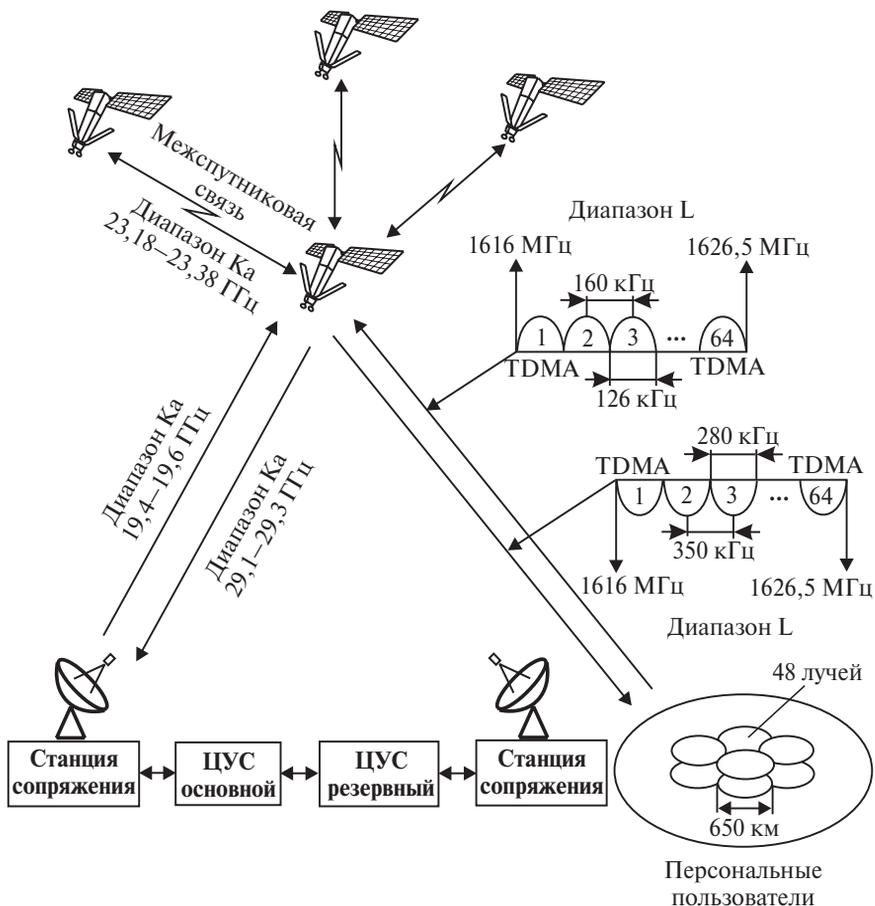


Рис. 29. Структура системы Iridium

на территории США. Основной центр управления (Чендлер, штат Аризона) выполняет анализ работоспособности элементов системы и контроль за работой всех КА, входящих в орбитальную группировку.

В наземный сегмент входит также система управления и контроля сети Iridium, которая обеспечивает глобальное администрирование сети, включая планирование запусков, отслеживание работоспособности КА, сбор и анализ телеметрической информации с КА. Первая станция расположена на севере штата Вирджиния (США), а вторая (резервная) – в Риме (Италия).

Наличие межспутниковых линий в Iridium не требует большого числа станций сопряжения. На первом этапе образовано 20 СС, в том числе по две в США и России.

Космический сегмент. Орбитальная группировка системы Iridium состоит из 66 основных КА, выведенных на орбиту высотой 780 км над поверхностью Земли, и 6 резервных КА (высота орбиты около 645 км). Спутники на основной орбите находятся в шести равноудаленных друг от друга орбитальных плоскостях по 11 КА в каждой плоскости. Угловой разнос между КА в одной плоскости составляет $32,7^\circ$. Соседние орбитальные плоскости разнесены примерно на $31,6^\circ$, а разнос между первой и шестой плоскостями составляет $22,1^\circ$. Вид орбиты квазиполярная круговая с наклоном $86,4^\circ$. Период обращения – 100 мин 28 с.

Каждый КА формирует зону обслуживания диаметром 4700 км и площадью около 19 млн км². Зоны обслуживания спутников разделены на сотовые ячейки (до 48 на один КА).

Конфигурация орбитальной группировки выбрана управляемой, что позволяет наиболее эффективно осуществить глобальное обслуживание абонентов. Система с заданной конфигурацией обеспечит 100 % охват поверхности Земли в течение 99,5 % времени.

Между КА организуется *межспутниковая связь*. Любой спутник может одновременно связаться с четырьмя другими спутниками:

- двумя спутниками, расположенными впереди и позади в той же орбитальной плоскости;
- двумя спутниками, находящимися слева и справа в соседних орбитальных плоскостях.

Космический аппарат. В КА использована трехосная стабилизация на основе автономной навигационной подсистемы со встроенными датчиками астроориентирования. Эта подсистема периодически с шагом 0,25 мс формирует данные с точностью $\pm 0,25^\circ$ о пространственном положении и ± 20 км по местоположению.

Выходная мощность панелей солнечных батарей равна 1430 Вт. Напряжение первичного электропитания СЭП – 22–36 В. Мощность потребления оборудования L-диапазона – 230 Вт. В качестве буферного источника питания использована 22-элементная никель-водородная аккумуляторная батарея емкостью 48 А/ч. Она обеспечивает автоматическое поддержание напряжения питания до выхода КА из зоны тени. Масса КА составляет 690 кг. Расчетный срок службы – 5 лет.

На КА установлены *три группы антенн*:

- шесть активных фазированных антенных решеток (АФАР), формирующих 48 парциальных лучей на прием и передачу в диапазоне 1616–1626,5 МГц;

- четыре антенны для организации связи со станциями сопряжения в диапазоне 19,4–19,6 ГГц и 29,1–29,3 ГГц;

- четыре волноводно-щелевые антенны для межспутниковой связи в диапазоне 23,18–23,38 ГГц.

Диаграммы направленности АФАР задают программным способом, что позволяет независимо изменять параметры каждого луча. Это дает возможность избежать перекрытия зон обслуживания смежных КА, особенно при их смещении к полюсу.

Вид поляризации: правая круговая в фидерной и абонентской линиях и вертикальная в межспутниковых линиях. Каждый спутник может поддерживать до 1100 телефонных соединений.

Запасные спутники обычно размещаются на орбите высотой порядка 650 км. Они переводятся на более высокую орбиту в случае отказа одного из спутников. После того как компания Iridium прошла процедуру банкротства, новые владельцы решили запустить семь новых резервных спутников, чтобы иметь по два резервных спутника в каждой плоскости. В настоящее время не все плоскости имеют резервные спутники, тем не менее в случае необходимости спутники могут быть перемещены с других плоскостей. Перемещение требует нескольких недель и уменьшает запас топлива, что в конечном счете сокращает период активной работы спутника.

Разработка спутников типа Iridium продолжается, есть планы к 2015 г. завершить разработку спутника Iridium NEXT – второго поколения системы, содержащей 66 основных и 6 резервных спутников. Они будут предоставлять такие возможности, как передача данных, данная функция была не очень хорошо реализована в оригинальной серии спутников. Спутники будут иметь запас по полезной нагрузке, который может быть использован для размещения камер, датчиков и др. Спутники Iridium также могут быть использованы для предоставления каналов связи другим спутникам как альтернатива строительству дополнительных станций наземного контроля.

Многостанционный доступ. На КА использована 48-лучевая антенная система, состоящая из шести активных фазированных антенных решеток, каждая из которых формирует восемь лучей. Один луч высвечивает на поверхности Земли зону обслуживания диаметром порядка 600 км. В совокупности 48 лучей формируют квазиплоскую подспутниковую зону диаметром более 4000 км.

В системе применена комбинация частотного и временного методов многостанционного доступа МДЧР и МДВР. Для разделения смежных лучей используют различные частоты (метод МДЧР). В каждой парци-

альной зоне (соте) формат многостанционного доступа – МДВР. Каждая 8-лучевая структура обеспечивает возможность многократного использования частот.

Связь по радиолинии абонент – КА осуществляется по 64 каналам (из них 9 каналов сигнализации). Разнос между каналами равен 160 кГц, полоса частот каждого канала – 126 кГц. В радиолинии КА – абонент организовано 29 каналов (4 – для сигнализации) с разносом 350 кГц и полосой частот каждого канала – 280 кГц.

Кадры МДВР для радиолиний абонент – КА и КА – абонент идентичны по структуре, но различаются скоростью передачи. Скорость передачи информации в линии абонент – КА составляет 180 кбит/с, а линии КА – абонент равна 400 кбит/с. Метод модуляции – квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом и сглаживанием фазы по закону приподнятого косинуса (QPSK).

Каждый абонент работает в пакетном режиме, используя метод передачи «один пакет на несущую». Кадр МДВР состоит из восьми временных окон (сегментов). Длительность кадра равна 90 мс. Время передачи пакета составляет 8,28 мс.

Для устранения внутрисистемных помех предусмотрен защитный временной интервал длительностью 22,48 мс. Такой защитный интервал уменьшает эффективность МДВР до 73 %.

Одним из ключевых аспектов в системе Iridium является *механизм перехода абонента из луча в луч* (из одной соты в другую), а также с одного КА на другой. При максимальном времени пребывания абонента в зоне радиовидимости одного КА порядка 8–10 мин и при 48 лучах на каждом КА интенсивность переходов может составить до одного раза в минуту. С учетом того, что в соседних лучах использованы разные рабочие частоты, процедура перехода в новую зону (соту) должна повлечь за собой и смену рабочей частоты абонентского терминала, т. е. в системе применен достаточно сложный алгоритм переключения рабочих частот наземных терминалов.

Характеристики радиолиний. В системе Iridium организованы абонентские, фидерные и межспутниковые линии связи, а также каналы для обмена командно-телеметрической информацией.

Для связи с подвижными абонентами в Iridium выделен L-диапазон (1610–1626,5 МГц). Учитывая тот факт, что в полосе частот 1610–1616 МГц работает на первичной основе российская навигационная система ГЛОНАСС (24 спутника, каждый из которых имеет отдельную несущую с разносом 562,5 кГц), а полоса 1610,5–1613,5 МГц выделена для радиоастрономических служб, то указанные участки спектра для работы Iridium исключены. Исходя из этого, в системе выбран диапазон частот 1616–

1626,5 МГц. Однако и в оставшейся части диапазона служба Iridium вынуждена работать на вторичной основе. Это означает, что она не должна создавать помех для служб с первым приоритетом, частоты которым уже присвоены или могут быть присвоены в ближайшее время.

В абонентских станциях применяют антенны типа «четырёхзаходная спираль» с коэффициентом усиления 1–3 дБ. Антенна обеспечивает прием радиосигналов в секторе углов 360° по азимуту и 10°–90° по углу места. Максимальная ЭИИМ абонентской станции составляет 5,9–8,8 дБ · Вт. Добротность приемника лежит в пределах от –23,8 до –21,8 дБ/К (шумовая температура составляет 553 К). Пороговое отношение сигнал/шум равно 3,1 дБ при вероятности ошибки 10^{–2}.

Основные характеристики абонентских, фидерных и межспутниковых линий приведены в табл. 13.

Таблица 13

Основные характеристики абонентских, фидерных и межспутниковых линий

Характеристики	Тип линии				
	Абонентская		Фидерная		Межспутниковая
Направление связи	Вверх	Вниз	Вверх	Вниз	
Диапазон частот, ГГц	1,6160–1,6255	1,6160–1,6255	29,1–29,3	19,4–19,6	23,18–23,38
Число каналов	64(9)	29(4)	6	6	8
Скорость передачи, кбит/с	180	400	12 500		25 000
ЭИИМ, дБ · Вт	8,45	24,5	68	14–27	37,9
G/T, дБ/К	–4,4	–23,8	–1,0	–24,5	от –5,3 до –7,0

Фидерные линии. Связь по фидерной линии между КА и станцией сопряжения осуществляется в диапазоне частот 19,4–19,6 ГГц. Каждый КА Iridium обеспечивает возможность работы в дуплексном режиме одновременно по двум линиям связи (с двумя СС или станциями управления КА), в каждой из которых передачу можно выполнять по шести каналам. Скорость передачи информации в фидерной линии составляет 12,5 Мбит/с. Разнос между каналами равен 15 МГц. В фидерной линии использовано помехоустойчивое кодирование, что обеспечивает вероятность ошибки на бит не хуже 10^{–6}.

На спутнике применены антенны типа АФАР. Коэффициент усиления в максимуме диаграммы направленности составляет 18 дБ в линии

СС – КА и 21,5 дБ в линии КА – СС. Шумовая температура приемных устройств фидерной линии равна 1454 К.

Для обеспечения устойчивой работы фидерных линий во время дождя или выпадения других атмосферных осадков предусмотрен энергетический запас, который равен 13 дБ в линии КА – СС и 26 дБ – в линии СС – КА.

Пропускная способность линии КА – СС составляет 1300 дуплексных каналов. В фидерной линии, как и в межспутниковой линии, используется метод статистического уплотнения каналов с коэффициентом сжатия 2,2.

Межспутниковые линии (МСЛ). Межспутниковая связь в Iridium организуется в Ка-диапазоне частот (23,18–23,38 ГГц). Планом частот предусмотрено размещение в полосе 200 МГц восьми отдельных частотных полос для исключения взаимных помех между каналами.

Скорость передачи информации в линии связи КА – КА составляет 25 Мбит/с. Разнос между частотными каналами равен 25 МГц. В канале межспутниковой связи используется код с прямым исправлением ошибок. Вероятность ошибки на бит не хуже 10^{-6} .

В МСЛ применена волноводная щелевая антенная решетка с механическим сканированием в азимутальной плоскости. Ширина диаграммы направленности в угломестной плоскости равна 5° , коэффициент усиления антенны составляет 36 дБ.

Пропускная способность каждой из четырех МСЛ – 600 каналов. С учетом того, что в ретрансляторе использовано сжатие с коэффициентом 2,2, максимальное число каналов, передаваемых одновременно по МСЛ, равно 1300.

Командно-телеметрическая линия (КТЛ) обеспечивает передачу на спутник команд управления КА и прием телеметрической информации, необходимой для контроля состояния и режимов работы бортовых систем.

КТЛ работает в штатном и нештатном режимах полета КА. Связь в обоих режимах осуществляется в Ка-диапазоне частот. В штатном режиме используют метод четырехкратной фазовой манипуляции и обеспечивают высокоскоростной обмен информацией с КА.

Нештатный режим предназначен для управления КА на начальном участке его выведения на орбиту, а также в случае отказа системы стабилизации КА или других нештатных ситуаций, приводящих к невозможности использования связных линий.

Для уменьшения влияния быстрого изменения фазы сигнала (за счет нарушения его стабилизации) применяют метод частотной манипуляции с некогерентной обработкой на приеме.

Относительно большой энергетический запас в командно-телеметрической линии необходим для обеспечения устойчивой работы радиолинии в условиях энергетических потерь, обусловленных изрезанностью диаграммы направленности бортовой антенны. Передача команд и прием телеметрической информации происходит на скорости 1 кбит/с при использовании на КА ненаправленной антенны с квазикруговой диаграммой направленности.

Особенности организации связи и пропускная способность каналов. В системе Iridium используются такие *типы каналов*, как:

- информационный, который служит для дуплексной телефонной связи передачи данных и факсимильных сообщений (максимально допустимая вероятность ошибки при сквозной передаче речи не хуже 10^{-2} , ожидается, что реально достоверность передачи информации будет находиться в пределах $10^{-3}–10^{-4}$);

- циркулярный, предназначенный для передачи с КА на терминалы служебных и синхронизирующих сигналов, в том числе номеров свободных каналов в каждой зоне обслуживания;

- несколько видов служебных: от абонента к КА и от КА к абоненту.

Связь между абонентами в сети осуществляется через *станции сопряжения*. Первоначально пользователь регистрируется в одной из СС, расположенной в ближайшем географическом регионе. База данных с указанием местоположения всех абонентов системы Iridium хранится на каждой СС, а обобщенная база данных — в центре управления сетью.

Если в регионе отсутствует наземная сотовая система радиотелефонной связи, то радиотелефонный терминал Iridium напрямую связывается с ближайшим КА, а далее — с нужным абонентом или другой СС. Вследствие того, что в Iridium имеются межспутниковые линии, то нет необходимости, чтобы СС находилась одновременно в зоне радиовидимости нескольких КА.

Радиотелефонный терминал обеспечивает работу в двух режимах: режиме сети Iridium и режиме сотовой сети одного из стандартов (GSM, AMPS и др.). Первоначально абонент делает попытку установить связь через наземную сотовую сеть. Если его попытка неудачна, тогда он входит в связь через спутниковую сеть.

Принимая вызов абонента, станция сопряжения, прежде всего, определяет, принадлежит ли данный абонент системе Iridium. Если да, то тогда местоположение вызываемого абонента находится с помощью собственной базы данных. После этого задается направление маршрутизации вызова и формируется маршрутный заголовок. Эти данные передаются на КА, где с их помощью выбирается положение коммутатора на спутнике.

Станции сопряжения. В системе Indium станции сопряжения предназначены для организации доступа пользователей к системе и обеспечения сопряжения с наземными коммутируемыми телефонными сетями общего пользования. Взаимодействие станции сопряжения с ТФОП в каждой стране или регионе осуществляется с учетом национальной системы нумерации и вида сигнализации. Сигналы начала и окончания разговора, тональные послышки вызова, сигналы оповещения и индикации условий разговора передаются по каналу сигнализации.

Средняя *пропускная способность* при использовании полосы частот 10,5 МГц составляет 80 каналов на один луч (55 каналов на линии «вверх» и 25 – на линии «вниз»). Максимальная пропускная способность на один КА при 48 лучах составляет 3840 симплексных каналов. В случае же двусторонней связи между абонентами количество каналов будет сокращено до 1100.

Глобальная пропускная способность системы Iridium определяется следующим образом. Каждый из 66 КА, используя 48 лучей, формирует на поверхности Земли в каждый момент времени 3168 зон. С учетом того, что одновременно активными могут быть только 70 % от числа зон, то общее число активных зон сократится до 2150. Теоретически максимальная пропускная способность составит 172 000 дуплексных каналов. Следует отметить, что реальная пропускная способность может оказаться существенно ниже указанной.

Одной из составляющих снижения реальной пропускной способности является практически отсутствие абонентов севернее 80° с.ш. и южнее 55° ю.ш., в результате чего из 66 КА одновременно могут быть использованы не более 46.

9.2. Низкоорбитальная система связи Globalstar

Проект Globalstar был запущен в 1991 г. как совместное предприятие корпораций Loral и Qualcomm. Globalstar получила разрешение от Федеральной комиссии связи на распределение спектра в США в январе 1995 г. и продолжала переговоры с рядом других суверенных государств для получения права на использование тех же радио частот в своих странах.

Первые спутники были запущены в феврале 1998 г., но развитие системы было отложено из-за одного неудачного запуска в сентябре 1998 г., что привело к потере 12 спутников, запущенных Российским космическим агентством. В феврале 2000 г. оно вывело на орбиту последние 52 спут-

ника — 48 спутников и четыре запасные части (сокращение от первоначального плана из восьми запчастей).

В октябре 1999 г. система начала испытания «дружественного пользователя» 44 из 48 запланированных спутников. В декабре 1999 г. система начала ограниченную коммерческую эксплуатацию для 200 пользователей со всеми 48 спутниками (без запасных частей на орбите). В феврале 2000 г. началась коммерческая эксплуатация 48 спутников и 4 запасных частей в Северной Америке, Европе и Бразилии. Первоначальная цена была 1,79 долл. США за минуту.

15 февраля 2002 г. предшественник компании Globalstar и три его дочерние компании подали добровольные ходатайства в соответствии с главой 11 Кодекса США о банкротстве.

Реструктуризация старой Globalstar была завершена в 2004 г. Первый этап реструктуризации был завершен 5 декабря 2003 г., когда ООО «Thermo Capital Partners» получило контроль над бизнесом, а также определенные права собственности и рисков. ООО «Thermo Capital Partners» стало основным владельцем. ООО «Globalstar» было образовано в штате Делавэр в ноябре 2003 г. и было переименовано в Globalstar, Inc. 17 марта 2006 г. В 2007 г. Globalstar запустила восемь дополнительных запасных спутников первого поколения в космос.

Спутники Globalstar имеют простые («прозрачные») ретрансляторы без бортовой коммутации сигналов, что обуславливает их малый вес (450 кг), высокую надежность, длительный срок жизни (7,5 года), а также более низкую стоимость по сравнению с другими проектами аналогичного назначения.

Система Globalstar структурно разделена на три основных сегмента — космический, наземный и пользовательский.

Космический сегмент. Орбитальная группировка системы Globalstar включает в себя 48 основных и 8 резервных КА. Спутники расположены в 8 орбитальных плоскостях по 6 КА в каждой. КА выводятся на круговые орбиты высотой 1414 км с наклоном к экватору 52° . Период обращения на этих орбитах равен 114 мин. Фазовый сдвиг между КА в соседних орбитальных плоскостях составляет $7,5^\circ$. Такая структура космического сегмента обеспечивает одновременное наблюдение на средних широтах — основном регионе обслуживания — не менее 2 КА. По этому показателю система Globalstar существенно отличается от конкурирующей системы Iridium, где структура космического сегмента основана на односпутниковом покрытии территории. Система Globalstar рассчитана на обслуживание территорий в средних широтах (в пределах от 70° с.ш. до 70° ю.ш.). В этой области обеспечивается практически постоянное *двукратное* покрытие земной поверхности.

Спутники Globalstar имеют простые ретрансляторы без обработки информации (bent-pipe) и межспутниковых линий связи. Связь между абонентами организуется в следующих диапазонах частот:

- Абонентская линия – направление связи Земля – КА: 1610–1626,5 МГц;

- Фидерная линия – направление связи Земля – КА: 5091–5250 МГц;

- Абонентская линия – направление связи КА – Земля: 2483,5–2500 МГц;

- Фидерная линия – направление связи КА – Земля: 6875–7055 МГц.

Бортовой комплекс L/S-диапазона содержит приемные и передающие активные фазированные антенные решетки (АФАР). Всего формируется 16 лучей. Усиление и форма лучей подобраны так, чтобы у поверхности Земли формировалась многосотовая зона покрытия. Коэффициент усиления в периферийных лучах выше, чем в первом, что необходимо для создания равномерной плотности потока мощности.

Антенны L- и S-диапазонов – печатные, многоэлементные. Приемная АФАР L-диапазона состоит из 61 элемента. Шумовая температура приемника в каждом луче составляет 460 К. Добротность равна –10 дБ/К. Передающая АФАР S-диапазона возбуждается 91-элементным усилителем. Мощность каждого элемента равна 4 Вт. Общая выходная мощность спутника достигает почти 400 Вт и может плавно перераспределяться между лучами. Средняя ЭИИМ в пересчете на один канал 2,4 кбит/с равна –2,9 дБ · Вт.

Антенна фидерной линии, работающая в С-диапазоне, имеет два луча с различной поляризацией. Коэффициент усиления антенны составляет 1 дБ на передачу и 3,6 дБ на прием. ЭИИМ ретранслятора для фидерной линии в пересчете на один канал 2,4 кбит/с равен –26 дБ · Вт. Общая пропускная способность ретранслятора на один КА – 2400 эквивалентных телефонных каналов.

Масса каждого КА равна 450 кг, максимальная мощность солнечных батарей – 1100 Вт. Планируемый срок активного существования приблизительно 7,5 лет. На спутниках устанавливается трехосная система стабилизации. Точность удержания аппарата на орбитальной позиции составляет не хуже $\pm 1^\circ$ вдоль орбиты и $\pm 1^\circ$ в сторону от орбиты.

В 2005 г. некоторые из спутников стали доходить до предела их срока эксплуатации – 7,5 лет. В декабре 2005 г. Globalstar начала перемещать некоторые свои спутники на орбиту захоронения выше околоземной орбиты. В 2007 г. Globalstar запустила восемь запасных спутников для своих уже существующих созвездий для того, чтобы сократить пробелы в

двусторонней голосовой связи и передаче данных, пока спутники второго поколения не станут доступны. До этого Globalstar будет продолжать предоставление услуг существующими спутниками.

В июле 2009 г. Globalstar Inc. объявила, что она получила полное финансирование для спутниковой группировки второго поколения и подпisaла поправки к первоначальному контракту, указав скорректированные условия для производства и новый график поставки спутников. Первые шесть спутников второго поколения были выведены на орбиту 19 октября 2010 г. с помощью ракеты-носителя «Союз-2» с космодрома «Байконур» в Казахстане. Ожидается, что спутники второго поколения обеспечат Globalstar клиентами голосовой спутниковой связи и передачи данных по крайней мере до 2025 г.

Наземный сегмент управления. В состав наземной сети управления Globalstar входят две основные подсистемы: центр управления наземной сетью GOCC (Ground Operations Control Center) и центр управления и контроля спутниковой группировкой SOCC (Satellite Operations Control Center). Обе подсистемы связаны между собой с помощью сети Globalstar Data Network, к которой подключены и наземные станции сопряжения. Взаимодействие различных элементов системы Globalstar иллюстрируется на рис. 30.

Центр управления и контроля орбитальной группировкой совместно с командно-телеметрическими станциями производит контроль орбит, обработку телеметрической информации и формирование команд. Кроме того, SOCC отслеживает текущее состояние КА и информирует центр управления сетью о доступных КА, их ресурсах и эфемеридах.

В задачи центра управления сетью (GOCC) входит планирование трафика, выделение и закрепление ресурсов, а также слежение за функционированием системы. SOCC не имеет собственного радиотехнического оборудования. По наземной линии связи он постоянно подключен к одной из СС. Эта станция сопряжения, в отличие от остальных, должна быть доукомплектована аппаратурой для приема телеметрии с борта КА и передачи команд управления.

В системе Globalstar используются шумоподобные сигналы (ШПС) и комбинация CDMA (*методов многостанционного доступа с кодовым*) и FDMA (*частотным разделением каналов*). Это позволяет решить ряд проблем и в первую очередь проблему многократного использования частот и повышения пропускной способности. В отличие от узкополосных сигналов, предъявляющих жесткие требования к уровню развязки между лучами многолучевой антенны, ШПС-сигналы позволяют существенно снизить требования к развязке между лучами. В результате можно

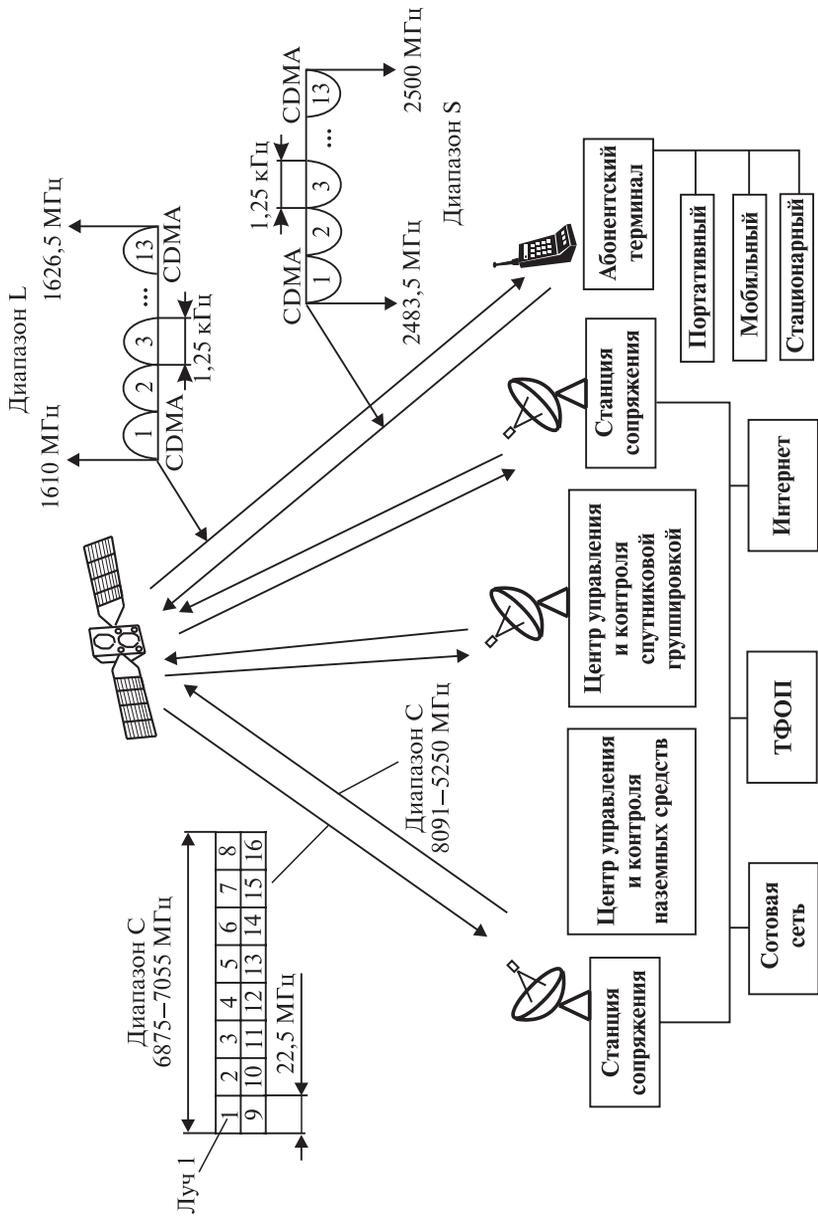


Рис. 30. Структура системы Globalstar

использовать одни и те же частоты в разных лучах. Одновременно могут быть снижены требования к электромагнитной совместимости с другими системами, работающими в том же диапазоне частот на первичной основе. Другое преимущество ШПС-сигналов состоит в возможности борьбы с помехами в виде отраженных сигналов путем их сложения с основным сигналом в многоканальном приемнике Globalstar. Приемник также позволяет принимать и обрабатывать разнесенные сигналы от разных лучей одного или нескольких КА.

Суммарная ширина полосы частот, отведенная для связи, равна 16,5 МГц. В этой полосе размещаются 13 частотных каналов. Ширина полосы каждого канала равна 1,25 МГц.

Внутри каждого из частотных каналов разделение производится по форме сигналов, т. е. по номеру последовательности Уолша. Всего для связи используется 127 CDMA-каналов (последовательностей Уолша). В линии КА – Земля организуются следующие виды каналов:

- один – для передачи пилот-сигнала (ПС);
- один – для синхросигнала;
- семь – для организации персонального вызова;
- оставшиеся 118 предназначены для информационного обмена.

В направлении от абонента на станцию сопряжения организуется также 127 каналов:

- 72 используются для сигнализации (так называемые каналы доступа);
- 55 – для передачи полезной информации.

Рассмотрим основные характеристики каналов, используемых для передачи данных от станции сопряжения. По каналу *пилот-сигнала* передается последовательность типа «все нули». Последовательность имеет длину, равную $(2^{17}-1)$. Вид модуляции – QPSK. Скорость передачи – 1,2 Мбит/с. Эта последовательность предназначена для контроля уровня сигнала в радиоканале.

Все СС используют один и тот же короткий код, но с различным сдвигом относительно единой шкалы времени. Сдвиг кода однозначно идентифицирует станцию сопряжения, спутник и луч.

По каналу *синхронизации* передается поток данных со скоростью 1200 бит/с. В нем содержится следующая информация: текущее время, код идентификации t СС эфемериды КА, расписание каналов пейджинга. Для защиты от ошибок используется помехоустойчивое кодирование ($r = 1/3$), а для борьбы с замираниями применено поблочное перемежение символов. Скорость синхросигнала после кодирования равна 4,8 кбит/с. Перед излучением этот поток складывается по модулю 2 со 128-символьной последовательностью Уолша.

По каналу *персонального вызова* передается технологическая информация, необходимая для установления соединения (частота, код идентификации пользователя, номер вызываемого абонента). Скорость передачи зависит от режима работы и может изменяться пределах от 2,4 кбит/с до 9,6 кбит/с. В канале используется сверточное кодирование ($r = 1/2$, $k = 9$) и поблочное перемежение символов. Выходной сигнал подвергается суммированию по модулю 2 с псевдослучайной последовательностью длиной $(2^4 - 1)$ бит.

Прямой информационный канал предназначен для передачи информационных сообщений абонентам сети Globalstar. В канале используется тот же алгоритм перекодирования информационных потоков со скоростью 2,4–9,6 кбит/с в выходной поток 19,2 кбит/с. Все абоненты системы используют одну и ту же последовательность, но различным (уникальным для каждого пользователя) временным сдвигом.

Рассмотрим основные характеристики каналов, используемых для передачи данных с абонентского терминала. *Канал доступа* предназначен для передачи запросных пакетов длительностью 60 мс. В канале используется протокол доступа типа «синхронная АЛОХА» (Slotted ALOHA). Пакет состоит из преамбулы и информационной части запроса. Преамбула представляет собой элемент длиной ПСП. Скорость передачи в канале доступа – 4,8 кбит/с.

Обратный информационный канал. По каналу абонент передает сообщения на СС. В канале используется сверточное кодирование ($r = 1/3$, $k = 9$) и поблочное перемежение пакетов символов длительностью 20 мс.

Рассмотрим организацию глобального роуминга в системе. Переход абонента из зоны в зону в системе Globalstar осуществляется плавно без прерывания связи и ухудшения качества приема информации. Это важно, так как позволит решить проблему затенения антенны рельефом местности и повысить надежность связи.

Механизм смены зон обслуживания достаточно простой. В любом из 16 лучей каждого КА передается свой пилот-сигнал. ПС предназначен для оперативного контроля уровня принимаемого сигнала. Как только происходит снижение уровня ПС в данном луче, абонентский терминал автоматически переключается на двухканальный режим работы.

В этом режиме обеспечивается одновременный прием сигналов от двух разных лучей или от разных КА. Например, абонент, работая в j -м луче, принимает пилот-сигнал ПС _{j} от космического аппарата КА _{j} . В приемнике по пилот-сигналу автоматически оценивается текущий уровень сигнала. Одновременно терминал производит последовательный поиск пилот-сигналов других лучей. Для каждого просматриваемого луча определяется разность в уровнях пилот-сигналов, т. е. $ПС_{II} - ПС_j \geq \Delta$, где Δ –

запас по порогу срабатывания, необходимый для исключения частого переключения лучей. Как только условие $PC_{\Pi} - PC_j \geq \Delta$ будет выполнено, то сообщение об $|$ сразу же передается на станцию сопряжения.

Приняв информацию об уровне PC_{Π} в n -м луче, наземная станция, обслуживающая данный регион, передает для абонента радиоданные n -го луча (номер сдвига ПСП и код канала). После этого обмен информацией между терминалом и СС осуществляется одновременно по двум лучам одного или разных КА. В приемниках абонентского терминала и СС происходит когерентное сложение разнесенных сигналов. Двухканальный режим работы радиолинии происходит до тех пор, пока не поступит команда на отключение j -го луча. После этого обмен информацией будет производиться только через n -й луч. Таким образом, происходит плавное переключение абонента из одной зоны обслуживания в другую без прерыва связи и ухудшения качества.

Станции сопряжения в системе Globalstar играют важную роль. Через них осуществляются все соединения с абонентами. Globalstar будет иметь свыше 50 станций сопряжения по всему миру, из которых уже построено более 10. Центр управления связью и полетами располагается на территории США, а центры управления национальными поставщиками услуг — на территории соответствующей страны. Такая технология позволит обеспечить большую надежность связи, чем использование для маршрутизации межспутниковых каналов связи. Региональный принцип построения системы привлекателен администрации для разных стран, поскольку позволяет им сделать Globalstar частью своей национальной сети. Учитывая, что основную часть графика в каждом регионе обычно составляют местные вызовы (более 80 %), то это позволит местным телекоммуникационным компаниям получать доход от эксплуатации системы. Станция сопряжения предназначена для решения таких задач, как:

- организация информационного обмена в обслуживаемом регионе;
- распределение сетевых ресурсов;
- подключение абонентов Globalstar к сетям общего пользования.

Все вызовы (местные и международные) обрабатываются и коммутируются в СС, причем время установления соединения не будет превышать 5 с, а максимальная задержка сигнала — 150 мс.

В состав СС входят 4 идентичных приемо-передающих комплекта, оснащенных следящими параболическими антеннами, подсистемы формирования и обработки ШПС-сигналов, интерфейсного оборудования и автоматизированных рабочих мест операторов, позволяющих производить учет графика и вычисление местоположения абонента по навигационным данным.

Коэффициент усиления следящей параболической антенны СС диаметром 5,5 м равен 42,4 дБ. Номинальная ЭИИМ станции в пересчете на один канал составляет 40,3 дБ · Вт. Шумовая температура приемного устройства не превышает 190 К.

Абонентские терминалы. В системе Globalstar планируется выпуск трех базовых типов терминалов: портативных, мобильных и стационарных.

Стационарные терминалы предназначены для работы только в системе Globalstar. Портативные и мобильные могут функционировать также в сотовой сети одного из стандартов GSM, CDMA, AMPS и PCS. Мощность мобильного терминала не превышает 3 Вт, портативного — 0,6 Вт.

Стационарный терминал имеет 4-канальный приемник с устройством когерентного сложения разнесенных сигналов. Один из каналов является поисковым, а три остальных — информационные. Одновременный прием и когерентное сложение нескольких сигналов используется для обеспечения мягкого (без прерывания связи) межлучевого перехода, а также для компенсации быстрых замираний. Это происходит как при переключении между лучами одного КА, так и при переходе с заходящего на восходящий КА. Компания Qualcomm выпускает портативные и мобильные терминалы трех типов: трехрежимные (Globalstar/AMPS/CDMA), двухрежимные (Globalstar/GSM) и однорежимные (Globalstar).

10. РЕГИОНАЛЬНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время наряду с глобальными системами персональной спутниковой связи все более активно развиваются и региональные системы. Уже начата эксплуатация региональной системы ACeS, предназначенной для обслуживания Азиатско-Тихоокеанского региона. В эксплуатации находится и еще один проект — система Thuraya, зона покрытия которой включает 99 стран Европы, Северной и Центральной Африки, Среднего Востока, Центральной Азии и Индии. На покрываемой территории, простирающейся по долготе от 20° з.д. до 100° в.д. и по широте от 20° ю.ш. до 60° с.ш., проживает около 40 % мирового населения.

Принципиально новым для мировой практики стало появление новых технологий, которые сделали возможным создание и развертывание в космосе многолучевых антенн с рефлектором больших размеров (диаметром 12 м и более). Сравнительные характеристики систем приведены в табл. 14.

Сравнительные характеристики региональных систем

Характеристика	Thuraya	ACeS	«Зеркало-КР»
Страна-владелец ресурса	ОАЭ	Индонезия	Россия и страны СНГ
Тип спутника	ГСО	ГСО	ГСО
Планируемое число абонентов в системе	1 750 000	2 000 000	350 000
Стартовая масса КА, кг	5250	4400	2600
Срок активного существования КА, лет	12–15	12	12
Число лучей на КА	250–300	140	30–40
Энергопотребление КА, Вт	13 000	4000	5700–6300
Средства вывода на орбиту	Ariane 5, Sea Launch	РН «Протон»	РН «Протон»
Тариф, долл./мин	Нет данных	1,0	0,4–0,6
Стоимость проекта, млн долл.	1000	900	360

Стоимость создания региональных систем в 2–5 раз меньше, чем глобальных, т. е. является привлекательным фактором для инвесторов. Немаловажен также и тот факт, что для развертывания региональной сети на начальной стадии требуется минимальный состав оборудования как на Земле, так и в космосе – всего один КА и комплект наземного оборудования для контроля и управления работой системы. Архитектура и принципы построения различных систем во многом совпадают. Система включает три основных сегмента: космический, пользовательский и наземный сегмент управления. Орбитальная группировка состоит из 1–2 КА на геостационарной орбите. Управление работой системы осуществляется с помощью центральной земной станции, называемой также первичной станцией сопряжения (PGW – Primary Gateway). В наземный сегмент могут входить также независимые региональные станции сопряжения, которые могут устанавливаться независимо в разных странах. Их использование позволит сделать тарифную политику более гибкой за счет сокращения объема международного трафика.

В настоящее время наиболее динамично развивается система Thuraya. Частная акционерная компания «Thuraya Satellite Telecommunications Company» была основана в Объединенных Арабских Эмиратах в январе 1997 г. для реализации проекта спутниковой подвижной связи. В составе ее акционеров находятся известные национальные операторы связи и финансовые институты стран Азии, Северной Америки и Европы. Разработчиком и создателем системы Thuraya является компания Boeing Satellite Systems, имеющая мировую известность в производстве самолетов и спутников.

Thuraya покрывает регион, включающий 99 стран с населением 2,5 млрд человек, составляющий 40 % земного шара. Услуги данной сети предназначены для археологических и геолого-разведочных экспедиций, путешественников, международных транспортных компаний, операторов морских/речных грузоперевозок, спасательных команд, спецслужб и работников отдаленных промышленных зон.

Система Thuraya предоставляет следующие услуги:

- передача голоса на портативный (Thuraya SO-2510, SG-2520, Hughes 7100/7101, Ascom 21) или стационарный терминал;

- SMS;

- передача данных и факсов на скорости 9,6 кбит/с;

- мобильный сервис передачи данных GPRS на терминалах SO и SG – 60 кбит/с к терминалу и 15 кбит/с в обратном канале;

- Thuraya DSL – передача данных на скорости 144 кбит/с на терминал размером с ноутбук;

- портативные терминалы имеют встроенный GPS-приемник;

- дополнительные сервисы: новости, call back, ожидание вызова, пропущенные вызовы, голосовая почта, WAP и т. д.

В настоящее время на орбите находятся три спутника системы: Thuraya 1, Thuraya 2 и Thuraya 3. Thuraya 1 находился на геостационарной орбите в позиции 44° в.д., затем был переведен в резерв на позицию 98,5° в.д. и в настоящее время находится восточнее, на позиции 122,5° в.д.

Первичная станция PGW расположена в г. Sharjan (ОАЭ). В ее состав входят несколько специализированных земных станций с вынесенными антенными постами. Центр управления и контроля работоспособности спутника (SOC) обеспечивает обработку телеметрической информации, поступающей с КА по фидерным линиям в С-диапазоне, и контролирует правильность функционирования всех его подсистем. Для оценки характеристик распространения сигналов в L-диапазоне на линии «вверх» в состав первичной станции сопряжения введена земная станция-радиомаяк DBS (Uplink Beacon Station). Пропускная способность на КА

в L-диапазоне составляет 13 750 симплексных каналов, что несколько больше, чем в системе аналогичного назначения ACeS (11 000 каналов).

Абонентские и фидерные линии системы Thuraya работают в тех же диапазонах частот, что и в системах Inmarsat и ACeS. В L-диапазоне (ширина полосы 24 МГц) организуется работа абонентских линий, а в С-диапазоне планируется обеспечить связь с помощью фидерных линий.

Связь между абонентами организуется в следующих диапазонах частот:

- Абонентская линия – направление связи Земля – КА (L-диапазон): 1626,5–1660,5 МГц;

- Фидерная линия – направление связи Земля – КА (С-диапазон): 6425–6725 МГц;

- Абонентская линия – направление связи КА – Земля (L-диапазон): 1525–1559 МГц;

- Фидерная линия – направление связи КА – Земля (С-диапазон): 3400–3625 МГц.

Для системы Thuraya разработана уникальная антенная система (диаметр 12,25 м), обеспечивающая формирование 250–300 «узких» лучей. Такая 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 может быть обеспечено гибкое перераспределение мощности между разными лучами, что позволяет сосредоточить до 20 % общей излучаемой мощности в одном луче. Высокая спектральная эффективность системы достигается за счет 30-кратного повторного использования рабочих частот.

Бортовой ретранслятор Thuraya позволяет организовать прямую связь между мобильными абонентами, работающими через разные лучи. Это очень важно, так как позволяет избежать «двойного скачка», возникающего в случае, когда групповой поток вначале сбрасывается вниз, перекоммутируется на наземных станциях сопряжения и затем возвращается на борт КА. Что же касается организации связи мобильных абонентов с абонентами сетей общего пользования, то она осуществляется в режиме bent-pipe, т. е. вся обработка информации осуществляется на Земле.

Высокая энергетическая эффективность ретранслятора Thuraya (запас в абонентской линии достигает 10 дБ) реализована за счет использования не только «узких» лучей, но высокоэффективной системы электропитания с солнечными батареями, обеспечивающими выходную мощность, равную 13 кВт. Основные характеристики КА Thuraya 3:

- Стартовая масса КА – 5173 кг;

- Масса на орбите (в начале эксплуатации на орбите) – 3200 кг;

- Размеры антенны – 12,25 м;
- Число «узких» лучей в L-диапазоне – 250–300;
- Размах панели солнечных батарей – 34 м;
- Мощность системы электропитания (в начале эксплуатации на орбите) – 13 кВт;
- Мощность системы электропитания (в конце гарантированного ресурса работы) – 11 кВт;
- Емкость аккумуляторной батареи – 250 А · ч.

Основные технические характеристики КА, такие как масса, излучаемая мощность и напряжение солнечных батарей имеют максимальные значения в начальный момент работы на орбите и по мере увеличения срока службы эксплуатации деградируют.

Персональная связь в системе Thuraya организуется по уже хорошо апробированной схеме. В тех районах, где существуют сотовые зоны покрытия, связь организуется через наземные сети, а за их пределами – в спутниковом режиме. Важным отличием от низкоорбитальных систем Iridium и Globalstar, которые вынуждены обеспечивать сопряжение с большим числом разнотипных стандартов, используемых в разных регионах мира (GSM, AMPS, TDMA, CDMA, PDC), является то, что региональная связь обеспечивается только в двух режимах – GSM/Thuraya.

Базовым абонентским устройством в Thuraya является портативный терминал типа «телефонная трубка», который обеспечивает работу в двух режимах: непосредственно через спутник или наземную сеть GSM. В качестве антенны в терминале используется четырехзаходная спираль. Технические характеристики портативных терминалов для системы Thuraya имеют следующие показатели:

- Метод доступа к КА – FDMA/TDMA;
- Скорость передачи в радиоканале – 46,8 кбит/с;
- Число интервалов в кадре – 8;
- Тип модуляции – QPSK;
- Полоса пропускания канала – 27,7 кГц;
- Скорость передачи данных – 2,4; 4,8 и 9,6 кбит/с.

Еще одним представителем региональных систем персональной спутниковой связи является система «Гонец». Она осуществляет как *глобальное* (межрегиональное), так и *региональное* обслуживание абонентов системы и обеспечивает возможность построения циркулярных, радиальных, радиально-узловых и комбинированных подсистем связи, а также сетей с возможностью связи по схеме «каждый с каждым».

Обмен информацией в подсистемах связи осуществляется по адресному признаку через один или несколько КА (каждому абонентскому терминалу (АТ) при этом присваивается уникальный сетевой номер).

Система способна обслуживать до 4000–10 000 терминалов в зависимости от интенсивности обращения в систему, объемов передаваемой в одном сеансе информации и режима обслуживания. Объем сообщения, передаваемого при одном обращении к спутниковому каналу (в одном сеансе), до 100 кбит.

Сообщения могут передаваться в двух режимах:

- *групповом режиме* (в масштабе времени, близком к реальному), когда отправитель и получатель сообщений находятся одновременно в зоне радиовидимости КА;

- *в режиме «электронная почта»* с запоминанием и хранением сообщений на борту КА до их переноса в зону расположения получателя, когда отправитель и получатель сообщений расположены в различных зонах.

Услуги связи, предоставляемые системой «Гонец», ориентированы, в основном, на региональное обслуживание абонентов. Протяженность региона, в центре которого расположена региональная станция (РС), составляет 3500–4000 км.

Связью в регионе управляет РС, сообщения при этом передаются в масштабе времени близкому к реальному (1–2 мин). Организация связи при этом предусматривает обмен сообщениями между абонентами некоторой группы через общее для них запоминающее устройство (ЗУ) КА. В одном регионе может располагаться одна или несколько ведомственных региональных станций, которые обслуживают свои корпоративные сети.

Региональная станция рассчитывает зоны уверенного обслуживания терминалов своего региона каждым спутником системы и заказывает в ЦУС необходимый ресурс. ЦУС распределяет между региональными станциями общий ресурс системы и составляет расписание их работы.

Региональная станция в выделенное для ее работы время включает на спутнике признак «Спецобслуживание». При этом становится возможной оперативная связь между абонентами данного региона. Региональная станция может организовать обслуживание определенных групп абонентов, например сбор информации с датчиковых систем, сбор информации о местоположении транспортных средств.

По принципу региональной связи может быть организована связь между морскими судами, при этом региональная станция этой сети размещается на берегу или на одном из судов.

Через региональную станцию может быть установлена связь с абонентами сетей общего пользования.

Терминалы, не входящие в ведомственные сети, обслуживаются спутниками системы «Гонец-Д1» в персональном режиме, когда на спутнике не включен признак «Спецобслуживание». Возможность размещения

таких терминалов в регионе определяется ЦУС в зависимости от уже заявленного трафика средств системы данного региона.

Наряду с ориентацией системы на региональное обслуживание абонентов, даже один КА может обеспечить глобальность их обслуживания, т. е. передачу сообщений от одного абонента к другому при их расположении в разных регионах (в любых точках земного шара).

При невысоких требованиях к оперативности доставки (до нескольких часов) доставка осуществляется в режиме «электронная почта»: сообщение, переданное на КА абонентом-отправителем, запоминается в его ЗУ и передается абоненту-получателю, когда КА появится в его зоне радиовидимости.

Организация связи в персональном режиме является разновидностью межрегиональной связи и предусматривает передачу информации абонентам через индивидуально закрепленные за ними запоминающими устройствами на КА.

Срочная доставка по межрегиональным маршрутам может производиться с использованием каналов других систем связи. В этом случае сообщение, доставленное спутником «Гонец-Д1» на региональную станцию, может передаваться далее по телефонным сетям общего пользования, выделенным сетям передачи данных, через станции фиксированной спутниковой связи.

11. ГЕОСТАЦИОНАРНАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ INMARSAT

Международная система связи INMARSAT компании Inmarsat (штаб-квартира в Лондоне) первоначально была создана для обеспечения безопасности мореплавания. С течением времени связь INMARSAT нашла многочисленных пользователей на суше и в воздухе, особенно в тех регионах, где традиционные средства связи ненадежны или вообще отсутствуют. Сохранив изначальный статус международной организации, Inmarsat в апреле 1999 г. стала частной компанией с ограниченной ответственностью (Inmarsat Ltd.), зарегистрированной в Великобритании.

Inmarsat располагает более чем 170 000 пользователей, которых обслуживают около 200 поставщиков услуг системы более чем из 80 стран. Inmarsat имеет также других партнеров (производителей оборудования, поставщиков программных продуктов, системных интеграторов (системотехнических предприятий), предприятия по сбыту услуг и оборудова-

ния). Inmarsat занимает исключительное положение, имея лицензии на эксплуатацию системы в 171 государстве. Это положение появилось еще в 1979 г. INMARSAT стала первопроходцем в разработке и создании глобальной системы спутниковой связи. Имея за спиной большой опыт работы, Inmarsat в настоящее время эксплуатирует собственные геостационарные спутники четырех поколений. Технически система INMARSAT состоит из орбитальной группировки спутников, расположенных на геостационарной орбите, сети БЗС (береговых земных станций) и абонентских терминалов. Вызов от абонентского терминала через спутник поступает на БЗС, которая затем маршрутизирует его в соответствующую наземную сеть. В обратном направлении вызов от абонента поступает на БЗС, которая маршрутизирует его на терминал. Таким образом, все функции установления соединения выполняются БЗС, спутники используют только для ретрансляции сигнала.

Управление сетью в системе INMARSAT осуществляется следующим образом. Трафик через спутники INMARSAT отслеживается и управляется сетевым управляющим центром (NOC), расположенным в главном офисе Inmarsat в Лондоне. Работа NOC поддерживается сетевыми координирующими станциями (NCS). Основная задача NCS – выделение каналов БЗС и терминала для установления соединения. Существует по одной NCS для каждого океанского региона и стандарта (А, В, С и т. д.). Все NCS постоянно обмениваются между собой и с NOC оперативной информацией.

Абонентские терминалы разделяются на несколько больших групп, так называемых стандартов. Терминалы каждого из стандартов имеют одинаковый набор предоставляемых услуг. Приведем краткую характеристику существующих стандартов:

- Стандарт А – самый первый тип терминалов INMARSAT. Обеспечивает передачу голоса и телекса по аналоговому каналу. Также может обеспечивать высокоскоростную передачу данных (64 кбит/с). В настоящее время терминалы этого стандарта не выпускаются. Inmarsat планирует прекращение их поддержки.

- Стандарт В – цифровой вариант стандарта А, обеспечивает голос, факс (2,4 кбит/с), низкоскоростную передачу данных (2,4 кбит/с), телекс, HSD. Существует в судовом, наземном и автомобильном вариантах.

- Стандарт М – портативная версия стандарта В, первый терминал INMARSAT, размещавшийся в корпусе размера и вида обычного чемоданчика типа «дипломат». Обеспечивает голос, факс (2,4 кбит/с) и передачу данных (2,4 кбит/с). В настоящее время вытесняется терминалами Мини-М и М4(GAN).

- Стандарт Мини-М – уменьшенная и удешевленная версия стандарта М. Обеспечивает те же услуги, что и стандарт М, но имеет габариты среднего ноутбука.

- Стандарт GAN(M4) – расширенный вариант Мини-М. Первоначально назывался MultiMedia Mikni-M, отсюда М4. При тех же габаритах обеспечивает дополнительно режим ISDN (64/56 кбит/с) и MPDS. MPDS – режим, специально разработанный для обеспечения экономичной и комфортной работы в Интернете. При связи в режиме MPDS оплата взимается за переданный/принятый объем информации, а не за время соединения, как в остальных случаях. Скорость передачи данных в режиме MPDS не гарантирована, может достигать 64 кбит/с.

- Fleet – морской вариант GAN. Существует в трех вариантах, отличающихся функциональностью (и ценой). Самый функциональный – F77, затем F55 и F33.

- SWIFT – авиационный вариант GAN.

- Стандарт С – обеспечивает обмен текстовыми сообщениями как между терминалами, так и с различными наземными сетями передачи данных – X25, Интернет, X400. В судовом варианте может комплектоваться встроенным приемником GPS. Отличается малыми габаритами антенны и интерфейсного блока. В варианте Mini-C интерфейсный блок объединен с антенной при сохранении ее габаритов.

- Стандарт D и D+ – глобальный пейджер. D+ отличается возможностью отправки коротких сообщений.

Космические аппараты системы INMARSAT расположены в четырех точках над экватором, каждый из них обслуживает свою часть земной поверхности, так называемый океанский регион. Существует 4 океанских региона:

- Атлантика-восток (AOR-E), спутник расположен в точке 15,5° з.д.
- Атлантика-запад (AOR-W), спутник расположен в точке 54° з.д.
- Тихоокеанский (POR), спутник расположен в точке 178° в.д.
- Индийский (IOR), спутник расположен в точке 64° в.д.

Каждому из океанских регионов соответствуют свои международные коды набора, используемые при вызовах в направлениях терминал – терминал и берег – терминал в режиме «телекс»:

- Атлантика-восток (AOR-E): 581;
- Атлантика-запад (AOR-W): телефон – 874, телекс – 584;
- Тихоокеанский (POR): телефон – 872, телекс – 582;
- Индийский (IOR): телефон – 873, телекс – 583.

Для телефонии с 2009 г. используется единый код 870, обозначающий «все спутниковые регионы». Ранее использовавшиеся телефонные коды океанских регионов (871,872,873,874) официально возвращены ИТУ.

Центр управления космическими аппаратами INMARSAT расположен в Лондоне, станции слежения и сбора телеметрии – в Канаде, Китае и Италии. Inmarsat эксплуатирует КА трех поколений: Inmarsat I2, I3 и I4. Космические аппараты Inmarsat I2 были построены British Aerospace (сейчас BAE Systems), запущены в 1990–1992 гг. и имели расчетный срок службы 10 лет. В настоящее время КА I2–F3 выведен из эксплуатации, КА I2–F1, F2 и F4 используются как резервные для Тихоокеанского, Западно-Атлантического и Индийского регионов, а также сдаются в аренду.

Космические аппараты Inmarsat I3 были построены Lockheed Martin Astro Space (сейчас Lockheed Martin Missiles & Space), отвечавшим за бортовые системы, и European Matra Marconi Space (сейчас Astrium), разработавшим оборудование связи. 5 КА были запущены в 1996–1998 гг. В космических аппаратах Inmarsat I3 использована концепция зональных лучей, поэтому каждый из них способен генерировать глобальный и до семи зональных лучей. Благодаря применению зональных лучей стала возможна разработка более компактных абонентских терминалов, таких как Inmarsat-M и Мини-M.

Космические аппараты I4 – последнее добавление в группировке спутников INMARSAT. Запущены два из запланированных трех КА. Эти аппараты являются основой для новой широкополосной сети INMARSAT. Каждый из КА I4 имеет большую емкость, чем три КА I3. По сравнению с предыдущим поколением в 60 раз увеличена мощность, в 12 раз увеличена эффективность использования спектра, в 25 раз – чувствительность приемников. Как и предшественники, I4 имеют глобальный луч, покрывающий 1/3 земной поверхности, и 19 широких зональных лучей, покрывающих ту же область и обеспечивающих работу новейших терминалов INMARSAT, таких как Fleet F77 128K, Fleet F55, Fleet F33. Имеются также 228 узких зональных лучей, обеспечивающих работу сети BGAN. Терминалы BGAN имеют скорость передачи данных до 492 кбит/с.

Система BGAN – первая в мире публично доступная мобильная сеть связи, обеспечивающая одновременную речевую связь и высокоскоростную передачу данных из практически любой точки суши с помощью одного портативного аппарата. Кроме того, это первая сеть такого рода, обеспечивающая гарантированную скорость соединения по запросу. Скорость передачи данных в сети BGAN может достигать 500 кбит/с. Таким образом, при работе в отдаленных местах вы можете пользоваться теми же услугами и приложениями, что и на рабочем месте в офисе.

BGAN использует для работы мощности КА Inmarsat четвертого поколения – I4. В настоящее время используются 3 КА: I4 Americas (введен в эксплуатацию 07.01.2009, расположен на 98° з.д.), I4 EMEA (рас-

положен на 25° в.д.) и I4 Asia-Pacific (расположен на 143.5° в.д.). Система Inmarsat BGAN является первой коммерчески доступной глобальной системой широкополосной спутниковой связи. Для связи используется диапазон L : от 1,5 до 1,6 ГГц. Канал занимает полосу 200 кГц. Сеть BGAN состоит из абонентских терминалов, спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите и наземного комплекса. В наземный комплекс входят БЗС, расположенные в Фучино (Италия) и Буруме (Нидерланды), а также шлюз для соединения с наземными сетями. В отличие от предыдущих стандартов INMARSAT, наземное оборудование принадлежит компании Inmarsat, а не ее партнерам. Обе БЗС связаны между собой и со шлюзом высокоскоростными каналами передачи данных.

Система INMARSAT BGAN поддерживает голосовые услуги и услуги передачи данных как с коммутацией каналов, так и с пакетной коммутацией:

- *Стандартные IP-услуги*: передача данных с переменной битовой скоростью (VBR); IP-передача данных фонового класса (в соответствии с определениями промышленных стандартов 3G); максимальная канальная скорость до 492 кбит/с на передачу и прием.

- *Услуги потоковой передачи IP-данных*: обслуживание с гарантированной битовой скоростью; доступность по запросу; QoS с классом точной передачи (в соответствии с определениями промышленных стандартов 3G); -32, 64, 128, 256 кбит/с на передачу и прием.

- *Голосовая связь*: услуги голосовой связи 4 кбит/с с коммутацией каналов; звонки осуществляются с помощью внешней трубки или гарнитуры (в некоторых терминалах возможно подключение по Bluetooth); голосовая почта; дополнительные услуги (ожидание вызова, запрет вызова, удержание вызова, переадресация).

- *ISDN*: 64 кбит/с; неограниченные/ограниченные потоки данных (UDI/RDI); цифровой и аналоговый режим.

- *SMS*: обмен SMS между терминалами BGAN; поддерживается возможность обмена SMS с наземными сетями сотовой связи.

Управление терминалом BGAN производится с помощью стандартного программного интерфейса, единого для всех типов терминалов, – BGAN LaunchPad. BGAN LaunchPad существует в версиях для Windows 2000, XP, MacOS 9.2, 10.1, Linux RedHat 9. Основные свойства BGAN LaunchPad:

- простота в использовании;
- пошаговые инструкции по ориентированию спутникового терминала и настройке соединения;
- возможность индивидуальной настройки параметров передачи данных в зависимости от специфики применения;

- предустановка параметров пользовательского доступа, например для ограничения доступа к потоковой передаче данных;
- онлайн-доступ к учетным данным и информации биллинговой системы;
- персональные и корпоративные версии;
- доступ к службам обмена текстовыми сообщениями (SMS) и телефонной связи.

12. СРЕДНЕОРБИТАЛЬНАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ ODYSSEY

Система персональной спутниковой связи Odyssey предназначена для организации радиотелефонной связи, передачи данных и коротких сообщений о местоположении подвижных объектов.

Космический сегмент и зона обслуживания. Зонами обслуживания системы являются территория континентальной части США с прибрежными районами, Европа, Азия и акватория Тихого океана. Для глобального покрытия Земли использованы средневысотные круговые орбиты. Космический сегмент системы Odyssey состоит из 12 КА, выведенных в орбитальные плоскости высотой 10 354 км и наклоном 50° . В каждой плоскости находится по четыре КА. Период обращения каждого из них составляет около шести часов при угловой скорости полета около 1 град/мин. Над большинством регионов суши одновременно *в зоне видимости ЗС* появляется не менее двух КА, причем хотя бы один из них будет не ниже 30° над горизонтом. Вся система обеспечит *обслуживание абонентов на территории Земли между 70° с.ш. и 70° ю.ш.* При ширине диаграммы направленности спутника, равной 40° , один КА обеспечит охват зоны диаметром свыше 7 тыс. км.

Отличительная особенность системы Odyssey – *квазистатичное покрытие поверхности Земли.* Каждый спутник имеет *многолучевую антенну, создающую непрерывную сотовую структуру покрытия* на поверхности Земли. Лучи КА Odyssey направляются на сушу, а также в наиболее судоходные акватории Мирового океана. По мере движения космических аппаратов по орбите система позиционирования лучей следит за тем, чтобы последние образовывали географически неподвижную сотовую структуру на обслуживаемой территории. Переключение зон обслуживания происходит в том случае, если углы над горизонтом, под

которыми наблюдается КА с земных станций, становятся недопустимо малы.

Радиовидимость двух спутников обеспечивает возможность работы наземным терминалам под сравнительно высокими углами места. В случае, если связь организуется через один спутник (второй в этот момент не используется), то рабочий угол места станции в 30° гарантирован в 95 % времени. Такие высокие углы места позволяют избежать дополнительного энергетического запаса радиолинии на потери распространения в ближней зоне (деревья, здания и другие преграды). На спутнике установлен «прозрачный» ретранслятор с преобразованием частоты, т. е. без обработки информации на борту. *Маршрутизацию и обработку сообщений выполняют станции сопряжения*, через которые пропускается весь региональный трафик.

Для передачи информации используют широкополосные сигналы и многостанционный доступ с кодовым разделением каналов (МДКР – CDMA).

Информацию от абонентских терминалов принимают в диапазоне частот 1610,0–1626,5 МГц (L-диапазон). Передачу от КА на абонентский терминал – в диапазоне частот 2483,5–2500,0 МГц (S-диапазон). ЭИИМ в канале КА – терминал составляет 24,2 дБ · Вт. В радиолиниях L- и S-диапазонов используют круговую поляризацию. Антенная система каждого из КА создает на земной поверхности 61 узкий луч. Для каждого из лучей выбирают одну пару несущих частот. Коэффициент повторного использования частот равен примерно 6. Ширина полосы частот в каждом приемном луче равна 11,35 МГц, а в передающем – 16,5 МГц. Участок спектра шириной 5,15 МГц на линии абонент – КА выделен для организации многостанционного доступа с временным разделением каналов.

Масса космического аппарата составляет 2500 кг. Срок активного существования КА составляет 15 лет. Мощность солнечных батарей в конце расчетного срока существования составит 4,6 кВт. Выведение спутников на орбиту осуществляется ракетой-носителем Atlas НА попарно.

Два спутника, одновременно обслуживающих какой-либо из регионов, обеспечивают *радиотелефонную цифровую связь с общей емкостью 6 тыс. телефонных каналов*. Для стационарных пользователей пропускная способность одного КА составляет более 10 тыс. каналов (режим передачи данных со скоростью 64 кбит/с). Для связи со станциями сопряжения на борту КА предусмотрены следящие направленные антенны с карданным подвесом. Работа фидерных линий осуществляется в K-диапазоне. Основные характеристики аппаратуры при работе по фидерной линии приведены в табл. 15.

Основные характеристики аппаратуры при работе по фидерной линии

Характеристики аппаратуры	Направление связи	
	Прием	Передача
Диапазон частот, ГГц	29,1–29,4	19,3–19,6
Общая ширина полосы, МГц	300	300
Ширина полосы канала, МГц	2,5	2,5
Коэффициент усиления антенны, дБ	38,5	35,7
Ширина луча по уровню 3 дБ, мин	2,2	3
Шумовая температура приемника, К	780	–
ЭИИМ, дБ · Вт	–	46,4

Наземный сегмент и организация связи. В системе не предусмотрено межспутниковых связей. Весь трафик в конкретном регионе пропускается через станции сопряжения, которые связаны между собой магистральными линиями связи.

В задачи СС входит прием/передача регионального трафика, обеспечение сопряжения с телефонной сетью общего пользования, управление межлучевой коммутацией, прием и обработка телеметрии с борта КА. При связи персональных пользователей с абонентами телефонных сетей общего пользования максимальная задержка составляет примерно 100 мс, что вполне приемлемо для слухового восприятия.

Каждый из обслуживаемых регионов имеет по одной станции сопряжения. В глобальной системе предусмотрено семь станций сопряжения. На каждой СС установлено четыре следящие параболические антенны диаметром 7 м. Три антенны используют для одновременной работы со спутниками. Четвертая антенна служит для переретрансляции трафика с одного на другой спутник при условии их одновременного нахождения в зоне радиовидимости СС. Основные характеристики станций сопряжения приведены в табл. 16.

Терминалы пользователя. Вследствие острой направленности бортовых антенн и высокой чувствительности приемных устройств спутников Odyssey, в абонентских станциях используют передатчики с малой выходной мощностью. Выпускают две модификации абонентских терминалов: с выходной мощностью передатчика персонального терминала до 0,5 Вт и мобильного до 5 Вт. Коэффициент усиления антенны типа четырехзавходной спирали равен 2,5 дБ. Энергетический запас на линии связи Земля – КА составляет 6–10 дБ.

Основные характеристики станций сопряжения

Характеристики станций сопряжения	Направление связи	
	Прием	Передача
Диапазон частот, ГГц	19,3–19,6	29,1–29,4
Общая ширина полосы, МГц	300	300
Ширина полосы канала, МГц	2,5	2,5
Коэффициент усиления антенны, дБ	64,8	60,8
Ширина луча по уровню 3 дБ, мин	2,2	10,2
Шумовая температура приемника, К	666,5	–
ЭИИМ, дБ · Вт	–	85,9

Радиотелефонный терминал обеспечивает возможность работы не только в системе Odyssey, но и в наземных сотовых сетях. Доступ к наземной сотовой сети является приоритетным. После определения свободных частот в этой сети в адрес базовой станции посылается вызов. В случае невозможности соединения с базовой станцией (или вызов блокируется, или все частоты заняты) терминал автоматически посылает запрос на спутник системы.

В ответ на запрос абонентскому терминалу автоматически назначается пара частот (передачи и приема) для работы в одном из лучей. Двухрежимный радиотелефонный терминал обеспечивает работу в сотовых сетях стандартов GSM, TDMA, CDMA, PHS.

Речь передается со скоростью 4,2 кбит/с. Вероятность ошибки в речевом канале составляет не более 10^{-3} . Данные передаются со скоростью от 2,4 до 64 кбит/с. Вероятность ошибки на бит – не более 10^{-5} . Для коррекции ошибок применяется сверхточное кодирование.

Предусмотрены модификации терминалов Odyssey, которые предоставят возможность приема сообщений персонального радиовызова с буквенно-цифровой индикацией (пейджинг), работу в режиме электронной почты, передачу коротких цифровых сообщений. Связь со стационарными пользователями и доступ в Интернет организуется со скоростью 64 кбит/с.

Координаты абонентского терминала определяют по собственным сигналам системы Odyssey. Относительно большое для средневысотной орбитальной группировки количество спутников позволяет на значительной территории наблюдать созвездие из двух или трех спутников под большими углами места. Это делает возможным определение местоположения только по сигналам КА Odyssey.

13. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

13.1. Влияние методов передачи сигналов на энергетический бюджет спутниковой радиолинии

Создание и применение новых систем спутниковой связи возможно только на условиях непричинения вредных помех уже реализованным спутниковым и наземным системам и обеспечения необходимой защиты от помех со стороны этих систем (обеспечения условий электромагнитной совместимости (ЭМС) затронутых систем). В этих условиях разработчики новых ССС решают непростую задачу *выбора ансамблей сигналов, эффективных методов их передачи и приема* для достижения *максимально возможной пропускной способности ССС при минимальном использовании ограниченного частотного и энергетического ресурсов* (полосы и мощности) спутниковой радиолинии (СРЛ) в условиях воздействия шума и помех на приемное оборудование космического и земного сегментов СРЛ.

Для оценки качества ССС наряду с *отношением мощность сигнала/мощность шума* $P_c/P_{\text{ш}}$ используется *отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума* E_b/N_0 и *вероятность появления ошибочного бита* P_b (BER). Энергия бита E_b определяется как

$$E_b = P_c \cdot T_b, \quad (60)$$

где P_c – мощность сигнала, Вт; T_b – время передачи одного бита, с.

Спектральная плотность мощности шума N_0 определяется как (для равномерного спектра шума)

$$N_0 = P_{\text{ш}} / \Delta f, \quad (61)$$

где $P_{\text{ш}}$ – мощность шума, Вт; Δf – ширина полосы, Гц. В качестве $P_{\text{ш}}$ может быть использовано значение как мощности собственного теплового шума системы, так и суммарная мощность собственного теплового шума и суммарная потеря мощности от помех всех внешних источников.

Таким образом *отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума* E_b/N_0 определяется выражением

$$E_b/N_0 = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot T_b \cdot \Delta f = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \cdot \frac{\Delta f}{R_b}, \quad (62)$$

где R_b – скорость передачи информации, бит/с.

Нормы на *вероятность появления ошибочного бита* P_b учитывают влияние помех и шумов, обусловленных поглощением в атмосфере и дожде, но не включают ошибки из-за отказа оборудования. Если ошибки возникают случайным и независимым образом (пуассоновская вероятностная модель), то среднее значение P_b полностью характеризует работу канала связи. Тем не менее наблюдения за частотой появления ошибок показывают, что они возникают пакетами, а поскольку эти пакеты затрагивают различные услуги ССС по-разному, для задания качества канала передачи необходимо иметь больше информации, чем среднее значение P_b . При оценке статистических моделей функций распределения ошибок в зависимости от процента времени измерения применяют такие показатели, как *секунды, пораженные ошибками* SES (severely errored seconds), и *секунды с ошибками* ES (errored seconds). Связь между вероятностью появления ошибочного бита P_b и отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 определяется *свойствами выбранного сигнала, методом кодирования и модуляции, методом приема сигнала*.

Для анализа помехоустойчивости и пропускной способности спутниковой радиолинии, образованной между передающей и приемной земными станциями через космическую станцию (КС) с бортовым ретранслятором, в ее состав включают: линию «вверх» (передающая ЗС – вход БРТР КС) и линию «вниз» (БРТР КС – вход приемника приемной ЗС). Частотно-энергетический ресурс линии «вверх» обусловлен полосой пропускания тракта передачи сигналов ЗС ($\Delta f_{ЗС}$), а также значениями ЭИИМ

передающей ЗС и добротности $Q_{КС} = \left(\frac{G}{T}\right)_{КС}$ приемника КС. Соответственно,

ресурс линии «вниз» обусловлен полосой пропускания тракта приема сигналов ЗС ($\Delta f_{ЗС}$), величинами ЭИИМ БРТР КС и добротности

$Q_{ЗС} = \left(\frac{G}{T}\right)_{ЗС}$ приемной ЗС. Собственно БРТР КС характеризуется значе-

ниями полосы пропускания ствола ($\Delta f_{БРТР}$, МГц) и максимальной выходной мощности ($P_{БРТР}$, Вт) в точке насыщения.

При простейшем методе обработки сигнала на КС – прямом усилении сигналов в БРТР без регенерации – совокупный частотно энергетический ресурс СРЛ (между передающей и приемной ЗС) зависит от характеристик каждого из двух упомянутых участков радиолинии. Применение БРТР с обработкой (регенерацией) сигналов на борту КА позволяет проводить независимую оптимизацию методов передачи сигналов на участках СРЛ «вверх» и «вниз» для достижения максимальной пропускной способности системы связи. *Эффективность использования*

ресурса СРЛ при заданных характеристиках ЗС и БРТР КС, можно повысить соответствующим *выбором оптимальных методов передачи* (кодирования и модуляции) *сигналов и способа многостанционного доступа* ЗС к БРТР КС.

Для повышения помехоустойчивости и эффективности передачи информации в современных ССС применяют цифровые методы передачи (помехоустойчивого кодирования-модуляции) и приема (демодуляции-декодирования) сигналов. При сравнении цифровых методов передачи сигналов по СРЛ в присутствии шумов и помех обычно используют два основных показателя: полосу частот Δf_c , занимаемую передаваемым сигналом при заданной скорости передачи информации $R_{\text{и}}$ и необходимое отношение мощности несущей P_c к сумме мощности шума и помехи $P_{\text{ш}}$ (дБ) в этой полосе частот для достижения требуемого качества приема информации (вероятности ошибки на бит P_b).

На основе этих показателей рассчитывается энергетический бюджет цифровой СРЛ – основной фундаментальный показатель, зависящий от характеристик земных и космической станций, а также от условий распространения сигналов в СРЛ с учетом специфики используемых диапазонов частот. Наиболее часто для оценки энергетического бюджета цифровой СРЛ используют отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 .

Различные комбинации методов модуляции и кодирования сигналов позволяют при заданных значениях $\Delta f_{\text{БРТР}}$ и $P_{\text{БРТР}}$ реализовать максимально возможную скорость передачи информации и/или снизить влияние помех за счет рационального использования полосы частот и энергетики СРЛ. Решение этих задач достигается выбором оптимальных ансамблей сигналов с необходимыми показателями спектральной и энергетической эффективности, методов их передачи и приема, при которых необходимая полоса частот ствола БРТР КС и его мощность ($\Delta f_{\text{БРТР}}$ и $P_{\text{БРТР}}$) использовались бы наиболее эффективно, поскольку экономия одного ресурса может обеспечиваться за счет большего расхода другого ресурса.

Например, при дефиците энергетики в канале передачи применяют методы модуляции с минимальными требованиями по величине E_b/N_0 и помехоустойчивое кодирование с высокой избыточностью, обеспечивая энергетический выигрыш в обмен на расширение требуемой полосы частот канала. В условиях дефицита полосы частот и достаточной энергетики применяют многопозиционные методы модуляции с высокими показателями спектральной эффективности (по величине бит/с/Гц), способные обеспечить передачу сигналов с необходимой информационной скоростью и ограниченной полосой частот. В первом случае в большей

степени расходуеться полоса частот ствола БРТР, во втором – его энергетический ресурс. Выбор оптимального по критериям спектральной и энергетической эффективности ансамбля сигналов позволяет использовать ресурсы полосы и мощности ствола РТР наиболее эффективно и в равной степени, достигая требуемой достоверности и скорости передачи информации в канале.

Реализованную при выбранных методах передачи и приема сигналов величину пропускной способности СРЛ удобно сравнить с теоретическим пределом (по Шеннону) для канала с ограниченной средней мощностью сигналов, который определяется в виде

$$C_s = \Delta f \cdot \log_2(1 + P_c/P_{\text{ш}}), \quad (63)$$

где C_s – предельная пропускная способность канала связи, бит/с; Δf – полоса пропускания канала связи, Гц; P_c – мощность полезного сигнала, Вт; $P_{\text{ш}}$ – мощность аддитивного белого гауссового шума, Вт.

Граница Шеннона в формуле (63) обозначает теоретический предел пропускной способности канала связи, достижимый для заданного отношения $P_c/P_{\text{ш}}$ при неограниченной задержке кодирования-декодирования информации и сколь угодно малой вероятности ошибки на бит. Для реальных сигналов с ограниченной средней мощностью достижимое значение пропускной способности при заданном отношении $P_c/P_{\text{ш}}$, определяющем эксплуатационные показатели качества и готовность ССС, будет всегда меньше теоретического предела (по Шеннону). Минимизация различия показателей предельной и достигнутой пропускной способности системы связи решается в каждом конкретном случае путем согласования методов многостанционного доступа, кодирования и модуляции сигналов с характеристиками канала передачи.

13.2. Способы многостанционного доступа в спутниковые системы связи

Обеспечение доступа множества земных станций к БРТР КС в ССС решается выбором такого ансамбля сигналов, который позволяет разделить сигналы отдельных ЗС при их совместной передаче в общем стволе спутникового БРТР. Как уже отмечалось, базовыми на сегодня являются способы многостанционного доступа (МД) с частотным, временным и кодовым разделением сигналов (МДЧР, МДВР и МДКР). В зависимости от применяемого способа МД различают односигнальный и многосигнальный режимы работы стволов БРТР КС, которые существенно влияют на энергетический бюджет спутниковой радиолинии.

МДЧР – способ многостанционного доступа с частотным разделением сигналов, при котором сигналы отдельных земных станций $3C_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$) передаются на разных несущих частотах f_i , в пределах общей полосы частот ствола БРТР КС $\Delta f_{\text{БРТР}}$ как это показано на рис. 31.

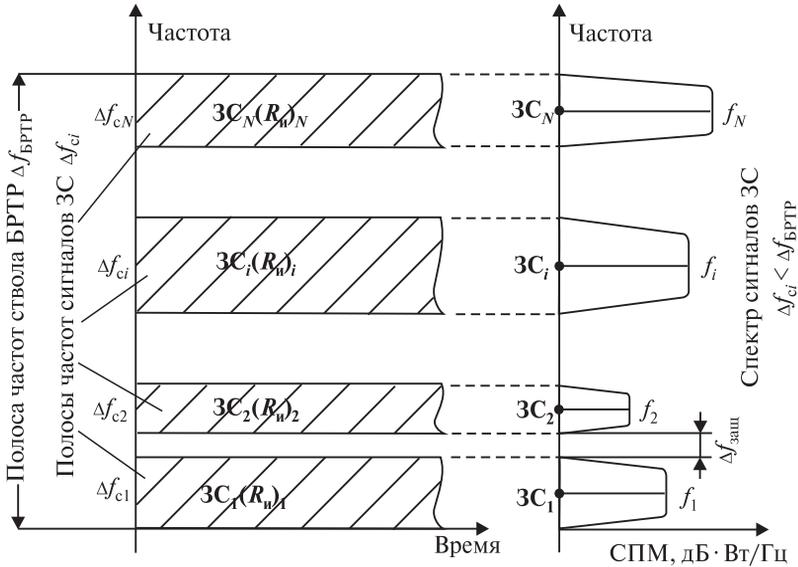


Рис. 31. Принцип передачи сигналов в стволе БРТР КС с МДЧР

МДЧР широко применяется в ССС по ряду технико-экономических причин: простоты аппаратной реализации, невысоких требований к параметрам сквозного тракта СРЛ (ЗС – БРТР – ЗС) и меньшей, чем при МДВР, необходимой мощности передатчиков ЗС для передачи каждого сигнала в ограниченной полосе частот $\Delta f_{ci} < \Delta f_{\text{БРТР}}$, пропорциональной требуемой скорости передачи информации $(R_{w_i})_i$. Реальная пропускная способность ствола БРТР КС в режиме МДЧР соответствует сумме парциальных значений скоростей передачи информации $R_{\text{БРТР}} = \sum_{i=1}^{i=N} (R_{w_i})_i$.

Основным недостатком МДЧР является низкая эффективность использования ресурса выходной мощности $P_{\text{БРТР}}$ (Вт) ствола БРТР, работающего при МДЧР в многосигнальном режиме усиления. Как известно, при большом числе совместно ретранслируемых сигналов ($N > > 10$) групповой сигнал на выходе ствола БРТР с МДЧР с достаточной точностью можно представить гауссовым шумом с равномерной спектральной

плотностью мощности в полосе частот $\Delta f_{\text{БРТР}}$ и пик-фактором порядка 8–11 дБ. Из-за появления взаимных помех между сигналами в нелинейном усилителе мощности БРТР КС последний должен использоваться в квазилинейном режиме со снижением выходной мощности (ОВО $\approx 4,0$ – $6,0$ дБ), при котором обеспечивается допустимый уровень комбинационных помех между ретранслируемыми сигналами. При этом почти на такую же величину (4,0–6,0 дБ) уменьшается пропускная способность ствола БРТР КС по сравнению с односигнальным режимом его работы. Этот фактор определяет энергетические преимущества односигнального режима (с МДВР) перед многосигнальным (с МДЧР и МДКР).

Возможная при МДЧР передача на каждой несущей Δf_i как одиночных каналов, так и многоканальных сообщений при выбранных методах модуляции приводит к существенным различиям по мощности и полосе частот отдельных ретранслируемых сигналов. Кроме того, передаваемые в общем стволе сигналы могут отличаться не только занимаемой полосой частот Δf_{ci} , но и спектральной плотностью мощности СПМ_i, если они предназначены для приемных ЗС с различной добротностью Q_{3C} . Во всех случаях нелинейность спутникового БРТР КС и других усилителей в тракте передачи группового многочастотного сигнала существенно влияет на искажения передаваемых сигналов, вызывая их взаимное подавление и появление продуктов интермодуляции.

Анализ зависимости уровня интермодуляционных помех на выходе БРТР с МДЧР от уровня загрузки УМ для шумовой модели группового сигнала показывает, что отношение сигнал/помеха на средней частоте ствола БРТР КС не превышает $P_c/P_{\text{пом}} = 12$ дБ при работе УМ в точке насыщения (ОВО = 0 дБ) и возрастает до значений $P_c/P_{\text{пом}} = 16$ дБ и 20 дБ при снижении уровня загрузки УМ (ОВО = 2 дБ и 6 дБ соответственно). Для крайних частот ствола БРТР значения $P_c/P_{\text{пом}}$ будут лучше на 2 дБ.

На помехоустойчивость и качество передачи сигналов с МДЧР также влияют линейные характеристики СРЛ (неравномерность амплитудно-частотной (АЧХ) и нелинейность фазочастотной (ФЧХ) характеристик тракта передачи, однако их влияние сказывается в пределах ограниченной полосы частот Δf_{3C} каждого из ретранслируемых сигналов, которые не столь широкополосны, как при МДВР.

Эффективность использования частотного ресурса ствола БРТР с МДЧР зависит от расстановки сигналов всех ЗС в общей полосе частот БРТР, исходя из допустимых искажений передаваемых сигналов и уровня межканальных помех (от соседних каналов). Для снижения межканальных помех необходимы защитные частотные интервалы $\Delta f_{\text{защ}}$ между сигналами, передаваемыми в соседних каналах, что снижает эффективность использования полосы частот ствола БРТР. Величина защитных интервалов $\Delta f_{\text{защ}}$ в определенной степени зависит от остаточных боковых полос спект-

ра каждого передаваемого сигнала и может быть оптимизирована применением сигналов с более «компактной» формой энергетического спектра, например сигналов с манипуляцией минимальным сдвигом (ММС) и/или применением в тракте передачи ЗС фильтрации модулированных сигналов для снижения уровня боковых полос их энергетического спектра.

Повысить пропускную способность ствола БРТР КС с МДЧР можно путем уменьшения частотного разноса между соседними каналами. Однако более плотная расстановка передаваемых сигналов приводит к росту межканальных помех и требует применения более сложных фильтров в трактах передачи и приема сигналов, которые, в свою очередь, ухудшают помехоустойчивость приема за счет появления межсимвольной интерференции.

МДВР – способ многостанционного доступа, при котором ретрансляция спутником сжатых во времени (пакетированных) широкополосных сигналов $\Delta f_{ci} = \Delta f_{\text{БРТР}}$ отдельных ЗС_{*i*} (*i* = 1, 2, ..., *N*) производится поочередно в неперекрывающиеся моменты времени (рис. 32).

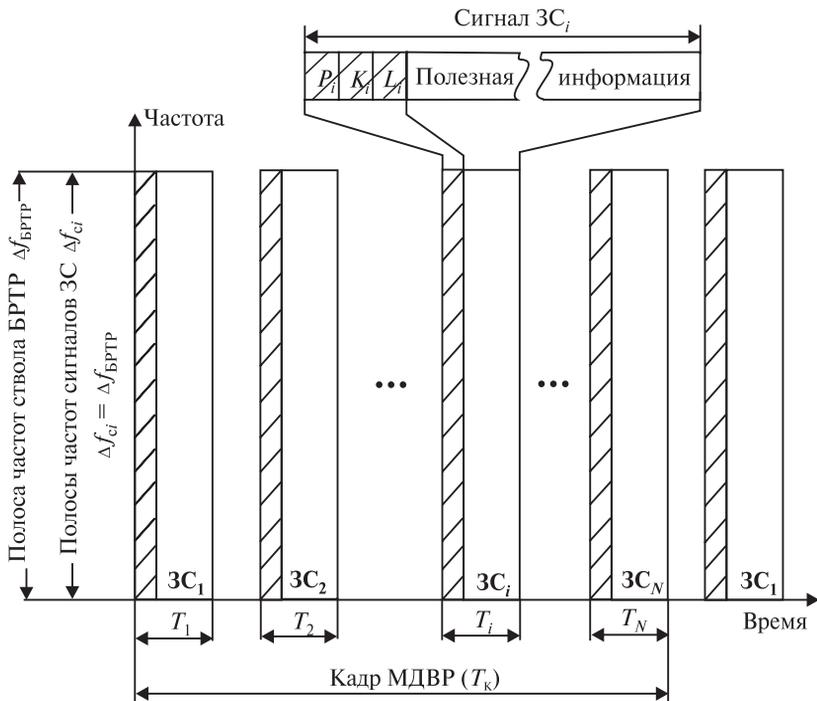


Рис. 32. Принцип передачи сигналов в стволе БРТР КС с МДВР

Это позволяет обеспечить односигнальный режим БРТР КС, исключить продукты искажений, возникающих в нелинейном УМ ствола БРТР, и максимально использовать его выходную мощность, работая вблизи точки насыщения ($ОВО \approx 0-1,0$ дБ). Показатель эффективности использования мощности БРТР КС в односигнальном режиме с МДВР достигает значений 90 % и более (потери меньше 0,5 дБ). Результатом этого является существенное (по сравнению с МДЧР) увеличение возможной мощности передачи полезного сигнала со спутника.

Кроме того, МДВР позволяет реализовать высокую эффективность использования полосы частот ствола БРТР, поскольку защитные частотные интервалы $\Delta f_{\text{защ}}$ между сигналами отдельных ЗС не требуются, а потери на защитные временные интервалы Δt , между соседними по времени сигналами ЗС могут быть уменьшены точными методами кадровой синхронизации. Необходимые защитные интервалы Δt предусмотрены во всех системах с МДВР для исключения взаимного наложения сигналов отдельных ЗС, передаваемых в общем временном кадре. Их величина (Δt) вызвана неидеальностью системы кадровой синхронизации в условиях воздействия на нее межстанционной расстройки и нестабильности частот тактовых генераторов ведущей ЗС (формирующей опорный кадр МДВР) и всех ведомых ЗС сети МДВР, а также наличия эффекта Доплера и его производных из-за циклического суточного дрейфа положения спутника на геостационарной орбите.

Реализуемая при МДВР эффективность использования мощности БРТР зависит также от показателя кадровой эффективности системы – соотношения долей времени передачи в кадре МДВР сигналов полезной информации и служебных сигналов, необходимых для обеспечения синхронизации и поддержания штатной работы оборудования ЗС системы. В общем виде показатель кадровой эффективности (η) при МДВР определяется следующим выражением:

$$\eta = 1 - \frac{T_S}{T_K} \sum_{i=1}^{i=N} (\Delta t_i + P_i + K_i + L_i), \quad (64)$$

где T_S – длительность символа, с, определяемая скоростью передачи информации, бит/с; T_K – длительность временного кадра системы с МДВР, с; Δt – защитный временной интервал между соседними по времени сигналами ЗС, символ; P_i – преамбула для восстановления в демодуляторе ЗС несущей и тактовой опорных частот из каждого принимаемого сигнала, символ; K_i – синхросигнал – код начала информационного пакета для синхронизации и фазирования канального оборудования МДВР на ЗС, символ; L_i – дополнительная служебная информация, используемая для

сервисных целей, символ; N – количество сигналов, передаваемых в кадре МДВР земными станциями, входящими в состав сети связи с МДВР.

Общий удельный вес совокупности всех необходимых служебных сигналов ($\Delta t + P_i + K_i + L_i$), представленных под знаком суммы в формуле (64) в большинстве реализованных систем с МДВР не превышает 5–10 % и может оптимизироваться путем изменения длительности кадра T_K .

При МДВР сигналы каждой ЗС с учетом их временного сжатия при передаче всегда широкополосные и занимают практически всю полосу ствола БРТР ($\Delta f_{ci} = \Delta f_{БРТР}$). Это предъявляет жесткие требования к характеристикам тракта СРЛ (ЗС – РТР – ЗС) в целом. На помехоустойчивость и качество передачи широкополосных сигналов с МДВР в основном влияют линейные характеристики СРЛ – неидеальность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик тракта во всей полосе частот $\Delta f_{БРТР}$. Кроме того, есть влияние нелинейности амплитудной и фазовой характеристик УМ БРТР КС, которые сопровождаются искажениями типа АМ – АМ – появлением внеполосных продуктов модуляции и АМ – ФМ – нелинейной межсимвольной интерференцией из-за преобразования амплитудной модуляции в фазовую, приводящими к дополнительным энергетическим потерям.

МДВР получил практическое применение в СССР позже МДЧР с реализацией в аппаратуре ЗС полностью цифровых методов передачи и обработки информации: сжатия информации во времени при передаче (временной компрессии) и восстановления исходной непрерывной формы сигнала на приеме (временного экспандирования). Важным условием практической реализации систем с МДВР было достижение высокого качества амплитудных характеристик УМ передатчиков ЗС и линейных параметров (АЧХ/ ФЧХ) сквозных трактов передачи (ЗС – РТР – ЗС) в полосах стволов БРТР (С- и Ku-диапазонов частот) для снижения энергетических потерь. Примерами практической реализации систем с МДВР служат: система TDMA–INTELSAT (США), $R_{и} = 120$ Мбит/с в полосе ствола 72 МГц и советская система МДВР-40 (СССР), $R_{и} = 40$ Мбит/с в полосе ствола 36 МГц.

Необходимо отметить, что широкому внедрению МДВР на спутниковых линиях связи не способствовали сложность и дороговизна аппаратуры МДВР и оборудования ЗС (мощные передатчики, большие антенны), необходимого для обеспечения высоких значений ЭИИМ и $Q_{ЗС}$ на ЗС сети при передаче сигналов с МДВР во всей полосе частот ствола БРТР КС.

Как уже отмечалось, многостанционный доступ с комбинированным разделением сигналов по частоте и времени (МДЧВР/МФ-TDMA)

применяется в мультисервисных спутниковых сетях на основе технологии VSAT, где объем трафика передачи разных ЗС существенно различен и часто меняется во времени в широких пределах в зависимости от набора предоставляемых сервисов (видео, Интернет, данные, речь).

При МДЧВР передача сигналов станциями VSAT ведется в ограниченной части полосы частот ствола РТР на нескольких несущих частотах, к которым организуется временной доступ в соответствии с частотно-временной матрицей «слов», выделенных каждой ЗС для передачи информации.

МДЧВР по эффективности использования мощности БРТР КС аналогичен МДЧР, но позволяет более гибко (по частоте и по времени) управлять использованием полосы частот ствола БРТР в сетях VSAT с переменным трафиком. ЗС при МДЧВР оказываются более простыми и экономичными, чем при МДВР, поскольку передача пакетированных сигналов на несущих частотах в ограниченной части полосы ствола БРТР ($\Delta f_{ci} < \Delta f_{\text{БРТР}}$) не требует применения высокой ЭИИМ, как для передачи широкополосных сигналов с МДВР во всей полосе частот ствола БРТР.

МДКР/CDMA – способ многостанционного доступа, при котором в общей полосе частот ствола БРТР одновременно передается ансамбль широкополосных кодовых последовательностей с необходимыми взаимокорреляционными свойствами для разделения сигналов на приеме. Режим работы БРТР КС при МДКР – многосигнальный, со всеми присутствующими ему искажениями передаваемых сигналов и энергетическими потерями, связанными с нелинейностью БРТР.

Передаваемые при МДКР в общем стволе БРТР КС сигналы каждой ЗС должны иметь большую базу (произведение полосы частот на длительность сигнала $\Delta f_{ci} \cdot T_{ci}$), при которой сигналы выбранного ансамбля становятся квазиортогональными и появляется возможность их разделения (по форме) методами корреляционного приема. Основную долю помех, возникающих при разделении реальных сигналов с МДКР на приеме, составляют внутрисистемные помехи, уровень которых обусловлен неидеальной взаимной ортогональностью сигналов, одновременно передаваемых в стволе БРТР КС.

В связи с недостаточно высокой пропускной способностью ССС, реализуемой при МДКР, данный способ многостанционного доступа не получил широкого распространения, хотя примеры его практического применения в спутниковых сетях имеются, например в спутниковой системе персональной подвижной связи Globalstar, работающей в ПСС в диапазонах частот 1,6/2,4 ГГц.

13.3. Методы модуляции и кодирования в спутниковых системах связи

В СССР обычно применяют методы модуляции сигналов с наиболее высокими показателями энергетической и спектральной эффективности. Наиболее распространены методы фазовой модуляции (ФМ-М), при которых сигнал имеет постоянную огибающую и относительно малую ширину полосы частот при заданной скорости передачи информации $R_{\text{ц}}$. Спектральная эффективность сигналов ФМ-М возрастает с увеличением кратности модуляции ($M = 2^m$, m – кратность модуляции), позволяя экономить полосу частот, необходимую для передачи сигнала с заданной скоростью $R_{\text{ц}}$, но проигрывая при этом в эффективности использования мощности (требуется более высокое отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 для достижения необходимой вероятности ошибки P_b).

Как было показано в п. 11.2, в односигнальном режиме БРТР КС с учетом эффективного использования его мощности (по критерию E_b/N_0) целесообразно применение методов фазовой модуляции с постоянной огибающей сигнала. Наилучший компромисс по спектральной и энергетической эффективности для большинства применений дает ФМ-4, что объясняет ее широкое использование в различных спутниковых системах связи и вещания.

При МДЧР и работе БРТР КС в квазилинейном режиме выбор методов модуляции более гибкий, но и здесь из-за присутствия продуктов искажений, свойственных МДЧР, применение отличных от ФМ-методов, например многоуровневой амплитудной модуляции (АМ), ограничено из-за ее высокой чувствительности к помехам. Однако в ряде случаев при остром дефиците полосы частот и достаточной энергетике применяют спектрально эффективную квадратурную АМ (8/16-QAM). Например, сигнально-кодовые конструкции (СКК) с модуляцией 16-QAM применяют для передачи сигналов цифрового телевидения с перевозимых репортажных станций DVB-DSNG в расчете на прием этих сигналов на профессиональные приемные антенны ЗС с высокой добротностью $Q_{\text{ЗС}}$ при экономном использовании полосы частот БРТР КС.

Объективно в каждой СРЛ присутствуют факторы, влияющие на качество передачи сигналов. К ним относятся: флуктуации фазы и расстройки частоты генераторов, фазовые шумы, искажения в фильтрах и помехи из-за межсимвольной интерференции. С целью минимизации этих факторов в современных СССР наибольшее распространение получили методы передачи с фазовой модуляцией при когерентном приеме с восстановле-

нием из принимаемого ФМ-сигнала несущей и тактовой опорных частот, необходимых для когерентного детектирования и синхронизации ФМ-демодулятора. Методы когерентного приема ФМ-сигналов среди прочих обладают наибольшей помехоустойчивостью и обеспечивают наилучшее качество приема сигнала (минимальную вероятность ошибки) в условиях воздействия перечисленных помеховых факторов реального спутникового канала при приемлемой сложности (стоимости) реализации и допустимом уровне собственных энергетических потерь реального ФМ-демодулятора.

Собственные энергетические потери модема показывают величину необходимого увеличения отношения $P_c / (P_{ш} + P_{пом})$ (дБ) на входе реального ФМ-демодулятора по сравнению с идеальным приемником, чтобы вероятность ошибки приема выбранного сигнала оставалась на прежнем уровне. Величина потерь позволяет оценить необходимое значение отношения $P_c / (P_{ш} + P_{пом})$ в реальных условиях и служит объективным показателем качества реализации ФМ-модемов. Для современных аппаратных решений собственные потери модемов ФМ-М ($M = 2, 4, 8$) удалось понизить до 0,8–1,5 дБ, а модемов 8/16-QAM – до 1,5–2,1 дБ (при измерениях по ПЧ).

Как известно, применение методов многопозиционной ФМ повышает удельную скорость передачи (спектральную эффективность), а помехоустойчивое кодирование (ФЕС) обеспечивает рост энергетической эффективности в обмен на снижение скорости передачи информации. Количественной оценкой эффективности различных типов ФЕС-кода является «энергетический выигрыш кодирования» (ЭВК) – снижение необходимого отношения $P_c / (P_{ш} + P_{пом})$ в полосе сигнала Δf_c по сравнению с некодированной передачей при вносимой кодером избыточности, определяемой относительной скоростью кода.

В современных спутниковых модемах широко применяются СКК на основе сочетания модуляции ФМ-М с разными видами помехоустойчивых кодов с различной избыточностью (r) для достижения требуемого значения ЭВК. К наиболее популярным ФЕС-кодам относятся: V + RS – каскадный код с внутренним сверточным кодом с декодированием по Витерби и внешним блочным кодом Рида – Соломона, TCM – решетчатый код, TCM + RS – каскадный код с внутренним решетчатым кодом и внешним блочным кодом Рида – Соломона, TPC – блочный турбокод, LDPC – блочный код с малой плотностью проверок на четность. Примеры реализации СКК в спутниковых модемах известных фирм-производителей (Comtech EF Data, Radyne, ComStream, Datum System, Paradise Datacom) представлены в табл. 17.

Таблица 17

Характеристики СКК современных спутниковых модемов с ФМ
 (СКК расположены в порядке возрастания их спектральной эффективности mr .
 Значения E_b/N_0 соответствуют вероятности ошибки на бит P_b : 10^{-5} , 10^{-7} , 10^{-9})

№	Параметры СКК				E_b/N_0 , дБ		
	СКК	m	r	mr	10^{-5}	10^{-7}	10^{-9}
1	TPC 5/16, ФМ-2	1	0,3125	0,3125	1,9	2,3	2,6
2	V+RS 1/2, ФМ-2	1	0,4545	0,4545	4,0	4,2	4,4
3	TPC 0,495, ФМ-2	1	0,4950	0,4950	2,5	2,7	3,0
4	LDPC 1/2, ФМ-2	1	0,5000	0,5000	1,7	1,8	2,0
5	TPC 0,793, ФМ-2	1	0,7930	0,7930	3,4	3,8	4,2
6	V + RS 1/2, ФМ-4	2	0,4444	0,8889	3,1	3,4	3,8
7	TPC 0,495, ФМ-4	2	0,4950	0,9990	2,5	2,7	3,0
8	LDPC 1/2, ФМ-4	2	0,5000	1,0000	1,7	1,8	2,0
9	TPC 1/2, ФМ-4	2	0,5000	1,0000	2,3	2,8	3,4
10	LDPC 2/3, ФМ-4	2	0,6667	1,3333	2,0	2,2	2,3
11	V + RS 3/4, ФМ-4	2	0,6818	1,3636	4,7	5,2	5,7
12	TPC 0,495, ФМ-8	3	0,4950	1,4850	2,5	2,7	3,0
13	LDPC 3/4, ФМ-4	2	0,7500	1,5000	2,6	2,8	3,0
14	TPC 3/4, ФМ-4	2	0,7500	1,5000	2,9	3,3	3,9
15	V + RS 7/8, ФМ-4	2	0,7778	1,5556	5,4	6,0	6,6
16	TPC 0,793, ФМ-4	2	0,7930	1,5860	3,4	3,8	4,2
17	TPC 7/8, ФМ-4	2	0,8750	1,7500	3,6	3,7	3,9
18	TCM + RS 2/3, ФМ-8	3	0,6119	1,8356	5,4	5,8	6,2
19	TPC 0,95, ФМ-4	2	0,9500	1,9000	5,8	6,3	6,9
20	TCM 2/3, ФМ-8	3	0,6667	2,0000	7,2	8,7	10,2
21	TPC 3/4, ФМ-8	3	0,7500	2,2500	5,5	6,0	6,7
22	TPC 0,793, ФМ-8	3	0,7930	2,3790	5,8	6,4	6,9
23	TPC 7/8, ФМ-8	3	0,8750	2,6250	6,5	6,7	6,9
24	TPC 0,95, ФМ-8	3	0,9500	2,8500	8,7	9,4	10,5

Отношения $P_c/P_{\text{ш}}$ и E_b/N_0 , используемые для сравнительной оценки энергетической эффективности сигнально-кодовых конструкций, связаны между собой следующим образом, дБ:

$$P_c/P_{\text{ш}} = E_b/N_0 + 10\lg(R_n/\Delta f_c). \quad (65)$$

Реализуемое на практике значение $R_n/\Delta f_c$ зависит от нескольких показателей: спектральной эффективности применяемого метода модуляции (m), относительной скорости FEC-кода (r) и величины показателя скругления АЧХ фильтра модулятора (α). Например, при модуляции ФМ-4 ($m = 2$), относительной скорости FEC-кода ($r = 3/4$) и показателе скругления ($\alpha = 0,25$) значение $R_n/\Delta f_c$ будет равно $(2 \cdot 3/4) \cdot (1/1,25) = 1,2$, а для спектрально эффективной модуляции АФМ-16 ($m = 4$) с малоизбыточным кодом ($r = 9/10$) и скруглением ($\alpha = 0,25$) величина $R_n/\Delta f_c$ возрастет до $(4 \cdot 9/10) \cdot (1/1,25) = 2,88$. Для этих примеров величина $P_c/P_{\text{ш}}$ возрастет по отношению к E_b/N_0 на 0,8 и 4,6 дБ соответственно.

Совместная оптимизация по критериям спектральной и энергетической эффективности ансамблей сигналов ФМ-М с представленными в табл. 18 FEC-кодами позволяет достигать максимально возможной скорости передачи информации по СРЛ с различным частотно-энергетическим ресурсом. При избытке полосы частот и дефиците энергетики необходимо применение модуляции ФМ-2 ($m = 1$) и кодов с высокой избыточностью ($r = 5/16$ или $1/2$), а при дефиците полосы частот и достаточно высокой энергетике сигналов с модуляцией ФМ-8 ($m = 3$) и малоизбыточных кодов для увеличения спектральной эффективности до $(mr) = 2,0-2,85$ бит/с/Гц.

В первом случае (ФМ-2) требуемое качество передачи информации достигается при пониженном до 2,3–3,8 дБ отношении E_b/N_0 , облегчая проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими спутниковыми сетями, а во втором случае (ФМ-8) экономится необходимая для передачи сигналов полоса частот (максимально в $2,85/0,3125 = 9,1$ раза, см. табл. 18), что позволяет обеспечить ЭМС затронутых систем за счет частотного разнеса.

Наряду с модемами со сравнительно простыми СКК на основе сочетания модуляции ФМ-4 с каскадным кодом (V+RS), способными обеспечить спектральную эффективность $(mr) = 0,9-1,55$ бит/с/Гц при значениях $E_b/N_0 = 3,4-6,0$ дБ, в настоящее время реализованы спутниковые модемы с более эффективными СКК на основе ФМ-8, амплитудно-фазовой модуляции (М-АФМ) и кодов с малой плотностью проверок на четность (LDPC) с высоким ЭВК. Эти СКК способны при прочих равных условиях обеспечить передачу сигналов с меньшими энергетическими затратами по величине $P_c/P_{\text{ш}}$ в более узкой полосе частот.

В кодеках этих модемов применяются новые каскадные коды: внутренний блочный код с малой плотностью проверок на четность (LDPC-код) с большой длиной кодового блока в сочетании с внешним блочным кодером БЧХ (ВСН – Bose–Chaudhuri–Nocquenghem) для улучшения энергетической эффективности. Максимальная длина кодового блока достигает 64 800 бит в тех случаях, когда задержка сигнала в декодере не критична, в других случаях используют LDPC-код с укороченной длиной кодового блока 16 200 бит, при которой деградация ЭВК не превосходит 0,2–0,3 дБ. Широкий выбор возможных кодовых скоростей LDPC-кода: $(r) = 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9$ и $9/10$ (всего 11 опций) – позволяет добиться высоких показателей спектральной и энергетической эффективности СКК с ФМ и АФМ для применения на спутниковых линиях с различным частотно-энергетическим ресурсом.

При реализации итеративного алгоритма декодирования LDPC-кодов с наиболее высокой избыточностью ($r = 1/4, 1/3, 2/5$) возможно достижение высоких значений ЭВК, сопоставимых с ЭВК турбокодов, при высокой скорости передачи информации в канале.

Коды с высокой избыточностью ($r = 1/4, 1/3$ и $2/5$) в сочетании с модуляцией ФМ-4 обеспечивают высокую энергетическую эффективность на спутниковых линиях с напряженным энергетическим бюджетом при значениях $P_c/P_{ш}$ от $-2,35$ до $-0,3$ дБ и спектральную эффективность (0,49–0,79) бит/с/Гц. Максимально достижимая спектральная эффективность при ФМ-4 с малоизбыточным кодом ($r = 9/10$) достигает 1,79 бит/с/Гц при $P_c/P_{ш} = -6,42$ дБ, как это показано в табл. 19.

СКК с ФМ-8 и опциями кодовых скоростей $r = 3/5, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9, 9/10$ позволяют повысить спектральную эффективность передачи до (1,78–2,68) бит/с/Гц при более высоких значениях $P_c/P_{ш} = 5,5–11$ дБ. Еще более существенный прирост удельной скорости передачи до значений 2,64–4,45 бит/с/Гц возможен на основе применения СКК с модуляцией 16/32-АФМ, пригодных только для СРЛ с высокой энергетикой ($P_c/P_{ш} = 9,0–16,1$ дБ) и высокой линейностью спутникового канала передачи. Спектрально-энергетические характеристики 8 из 28 опций СКК, предусмотренных стандартом DVB-S2, показаны в табл. 18. Они соответствуют граничным значениям избыточности каскадного (LDPC-ВСН) кода, применяемого со стандартными видами модуляции ФМ-4/8 и 16/32-АФМ. Показатели эффективности этих СКК рассчитаны для режима приема пакетов транспортного потока при $PER = 10^{-7}$ (PER – соотношение между числом правильно принятых транспортных пакетов и пакетов с ошибками после помехоустойчивого декодирования).

Характеристики эффективности СКК по стандарту DVB-S2

Режим модуляция/ кодирование (r)	Показатель спектральной эффективности (η)	Значение E_b/N_0 , дБ	Значение E_b/N_0 , дБ
ФМ-4; (1/4)	0,490243	-2,35	0,75
ФМ-4; (9/10)	1,788612	6,42	3,89
ФМ -8; (3/5)	1,779991	5,50	3,00
ФМ-8; (9/10)	2,679207	10,98	6,70
16-АФМ (2/3)	2,637201	8,97	4,76
16-АФМ: (9/10)	3,567342	13,13	7,61
32-АФМ; (3/4)	3,703295	12,73	7,04
32-АФМ; (9/10)	4,453027	16,05	9,56
		$E_b/N_0 = E_s/N_0 - 10\lg\eta$	

Представленные опции СКК на основе ФМ- и АФМ-сигналов с каскадным кодированием (LDPC-VCH) обеспечивают наиболее эффективную передачу цифровых сигналов в возможных режимах работы БРТР КС и реальное сокращение необходимого частотного и энергетического ресурсов СРЛ при оптимальном сочетании методов модуляции и помехоустойчивого кодирования. По спектрально-энергетическим показателям методы передачи информации по стандарту DVB-S2 превосходят существующие СКК с модуляцией ФМ-4/8, 16-QAM и каскадным кодом (сверточный код и код Рида – Соломона).

Важным этапом обработки цифровых сигналов при передаче по СРЛ, наряду с помехоустойчивым кодированием и модуляцией, является операция перемежения (перестановки) закодированных информационных символов на выходе кодера канала с последующим восстановлением исходной последовательности символов перед их декодированием на приеме. Перемежение обеспечивает декорреляцию пакетов ошибок, возникающих в реальном канале передачи под влиянием искажений и негауссовых помех, приближая параметры реального спутникового канала к идеальной модели двоичного симметричного канала с независимыми ошибками (канал без памяти), в котором применение ФМ-сигналов с помехоустойчивым кодированием наиболее эффективно. В связи с этим в современных цифровых спутниковых модемах получили распространение блочные (матричные) и сверточные периодические перемежители с различной глубиной перемежения в зависимости от типа используемых помехоустойчивых FEC-кодов.

13.4. Сравнение свойств сигналов с фазовой модуляцией (ФМ) и амплитудно-фазовой модуляцией (АФМ)

Для достижения максимально возможной пропускной способности в современных ССС применяются СКК на основе ФМ-сигналов различной кратности (ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8), а также с более сложными методами многопозиционной квадратурной АМ (8/16-QAM) и амплитудно-фазовой модуляции (16/32-АФМ) в сочетании с разнообразными помехоустойчивыми кодами. Помехоустойчивость различных ФМ- и АФМ-сигналов удобно сравнивать на основе геометрического представления сигнальных точек в системе координат, в которой каждый сигнал ансамбля изображают вектором с нормированной удельной энергией E_S . Такое геометрическое представление ансамблей сигналов с ФМ и АФМ показано на рис. 33, где I и Q – синфазный и квадратурный фазовые компоненты модулированного сигнала; ρ – радиус сферы расположения сигнальных точек ФМ-сигналов с нормированной удельной энергией E_S на символ, соответствующей условию $\rho^2 = 1$; R_i ($i = 1, 2, 3$) – геометрический радиус сфер, на которых расположены сигнальные точки ансамбля сигналов при модуляции 16-АФМ и 32-АФМ.

Реализация высокоэффективных методов передачи достигается таким расположением сигнальных точек, при котором одновременно обеспечиваются высокая удельная скорость (характеризуется плотностью расположения точек в сигнальном пространстве) и высокая помехоустойчивость (отражается достаточным разнесением сигнальных точек между собой). В качестве примера рассмотрим ансамбли сигналов с ФМ и АФМ.

Поскольку сигнальные точки при модуляции ФМ-2, ФМ-4 и ФМ-8, как показано на рис. 33, *а*, *б*, равноудалены от начала координат, энергия сигналов при модуляции не меняется и сигналы имеют постоянную огибающую, что позволяет применять их при работе БРТР КС вблизи точки насыщения.

При этом следует учитывать, что при прохождении ФМ-сигналов через полосовые фильтры спутникового тракта (передающей ЗС, приемной ЗС и БРТР КС) появляются нежелательные изменения их огибающей с глубиной модуляции, зависящей от величины скачков фазы ФМ-сигнала. Например, при изменении фазы ФМ-сигнала на $\pm 180^\circ$ глубина амплитудной модуляции сигнала достигает 100 %, что приводит к возникновению дополнительных искажений из-за нелинейности БРТР КС и соответствующих энергетических потерь, которые необходимо учитывать при расчете энергетического бюджета СРЛ.

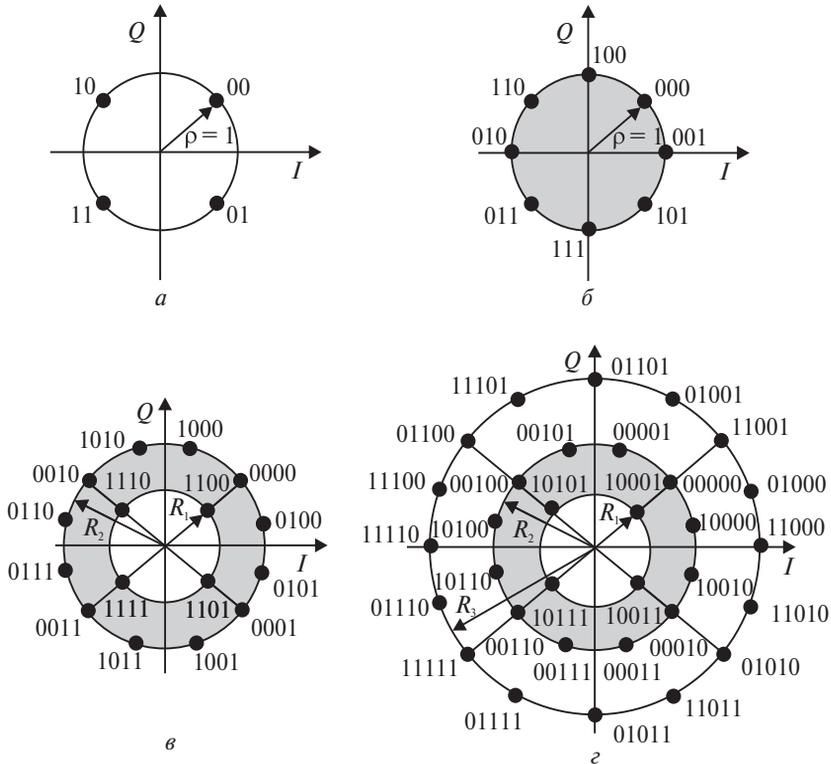


Рис. 33. Геометрическое представление пространства сигнальных точек при использовании методов модуляции:
 а – ФМ-2, ФМ-4; б – ФМ-8; в – 16-АФМ; з – 32-АФМ. Сигнальные точки ансамбля ФМ-2 соответствуют противоположным точкам (00-11) и (01-10)

Расчет вероятности ошибки при передаче сигналов методами ФМ различной кратности показывает одинаковую помехоустойчивость (значение BER при заданной величине E_b/N_0 сигналов ФМ-2 ($m = 1$) и ФМ-4 ($m = 2$). С ростом числа фаз ($m \geq 3$) помехоустойчивость сигналов ФМ-8/ФМ-16 быстро снижается, возрастают также собственные энергетические потери модемов. Энергетическая эффективность сигналов ФМ-2 и ФМ-4 совпадает, но удельная скорость передачи (спектральная эффективность) при ФМ-4 вдвое выше, чем при ФМ-2, поскольку сигнал ФМ-4 представляет суперпозицию двух ортогональных сигналов ФМ-2. Этим объясняется широкое применение модуляции ФМ-4 в различных ССС.

Энергия сигналов с АФМ не постоянна и зависит от конкретной реализации передаваемого сигнала. Сигналы 16-АФМ и 32-АФМ содержат точки, находящиеся на сферах с разными радиусами R_1 , R_2 и R_3 , как это показано на рис. 43, в, г, что обеспечивает более эффективную объемно-сферическую укладку сигналов по сравнению с сигналами ФМ-16 и ФМ-32 и позволяет их оптимизировать по критериям частотной и энергетической эффективности путем введения помехоустойчивого кодирования.

Сигнальные точки ансамбля 16-АФМ, как это показано на рис. 43, в, расположены на двух концентрических сферах: с радиусом R_1 — 4 точки и радиусом R_2 — 12 точек. А при модуляции 32-АФМ, как это показано на рис. 43, г, сигнальные точки расположены на трех сферах: с радиусом R_1 — 4 точки, с радиусом R_2 — 12 точек и с радиусом R_3 — 16 точек. Значения радиусов влияют на среднюю энергию АФМ-сигнала, причем оптимальная пространственно-сферическая укладка ансамблей сигналов 16-АФМ и 32-АФМ с учетом относительной скорости (r) применяемого LDPC-кода достигается при соотношении радиусов сфер R_2/R_1 и R_3/R_1 согласно табл. 19. Данные значения применяются в сигнально-кодовых конструкциях для спутникового цифрового вещания на основе стандарта DVB-S2.

Таблица 19

Оптимальные структуры сигналов АФМ

Виды СКК	16-АФМ		32-АФМ		
	Спектральная эффективность	R_2/R_1	Спектральная эффективность	R_2/R_1	R_3/R_1
Кодовая скорость FEC (r)					
2/3	2,66	3,15	—	—	—
3/4	2,99	2,85	3,74	2,84	5,27
4/5	3,19	2,75	3,99	2,72	4,87
5/6	3,32	2,70	4,15	2,64	4,64
8/9	3,55	2,60	4,43	2,54	4,33
9/10	3,59	2,57	4,49	2,53	4,30

По сравнению с обычными ФМ-сигналами с постоянной огибающей сигналы 16/32-АФМ более чувствительны к нелинейным искажениям и требуют значительного снижения выходной мощности БРТР КС от насыщения ($ОВО = 3-6$ дБ). Для уменьшения влияния нелинейности БРТР КС на эти сигналы возможно применение динамических предискажений в модуляторе передающей ЗС, позволяющих за счет линеаризации совокупной характеристики нелинейности тракта передачи (передающая ЗС + БРТР КС) понизить энергетические потери в спутниковом канале на 1,7–3,4 дБ при оптимальном выборе рабочей точки на БРТР КС.

Удобной мерой потенциальной помехоустойчивости выбранных ансамблей ФМ- и АФМ-сигналов служит минимальное энергетическое расстояние между сигнальными точками (d), зависящее от средней энергии сигнала, расходуемой на передачу одной двоичной единицы (бита). Для идеального приема сигналов с ФМ и АФМ различной кратности, величины d определены как:

$$\begin{aligned}d(\text{ФМ-2/ФМ-4}) &= 2\sqrt{E_b}; & d(\text{ФМ-8}) &= 1,325\sqrt{E_b}; \\d(\text{ФМ-16}) &= 0,78\sqrt{E_b}; & d(\text{АФМ-8}) &= 1,549\sqrt{E_b}; \\d(\text{АФМ-16}) &= 1,265\sqrt{E_b}.\end{aligned}$$

Сравнение потенциальной помехоустойчивости сигналов АФМ-8/16 и ФМ-8/16 (в линейном канале) по критерию энергетической эффективности свидетельствует в пользу АФМ, требующей меньшее значение E_b/N_0 (в 1,17/1,62 раза соответственно) для достижения нужной вероятности ошибки. Причина преимущества АФМ перед ФМ в более плотном и равномерном распределении сигнальных точек по пространству сигналов, что при равной средней энергии сигналов обеспечивает увеличение минимального расстояния (d) между сигналами и, следовательно, более высокую помехоустойчивость.

14. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

В 1998–1999 гг. по заданию Европейской комиссии работала спутниковая рабочая группа – SWG (Satellite Working Group), которая подготовила материалы по перспективам развития и ключевым технологиям ССС. На основе рекомендаций SWG Европейская комиссия подготовила программный документ – The EU Action Plan: Satellite Communications in the Information Society. Группой SWG были сформулированы базовые требования к перспективным ССС по основным технологическим категориям: бортовые комплексы, наземный сегмент, межсетевое взаимодействие и протоколы спутниковой связи.

Требования к бортовым ретрансляционным комплексам включают в себя следующие задачи:

- разработка высокопроизводительных бортовых комплексов;
- внедрение и широкое применение усовершенствованных антенных систем, способных генерировать десятки или даже сотни лучей;

- интенсивное использование бортовых цифровых компонентов 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 технологий LEO и MEO, хотя для отдельных применений спутники GEO остаются эффективной альтернативой;

- интеграция с наземными телекоммуникационными сетями и применение стандартов наземных сетей связи во всех случаях, где против того нет существенных причин.

По оценкам экспертов SWG ключевые технологии, необходимые для дополнения данных требований, наиболее продвинуты в разработках компаний США, что ориентируют европейские программы НИР/ОКР на достижение американских технологических позиций. В табл. 20 приводятся шесть ключевых технологий, определяющих уровень развития и эффективность бортовых комплексов.

К наземным сегментам и терминалам предъявляются такие требования, как:

- создание терминалов на базе СБИС и развитых DSP с малым энергопотреблением;

- использование терминалов как для спутниковой, так и наземной связи;

- программируемые радиоподсистемы для мобильных терминалов;

- использование спутникового разнесения для фиксированных терминалов в режимах широкополосной связи (Skybridge, WEST);

- применение технологии новых частотных полос (Ka, EHF, V);

- широкое использование эффективных методов модуляции и кодирования;

- максимальная стандартизация всех протоколов и интерфейсов на 2-м уровне и выше (кроме физического уровня, где параметры радиосигнала должны оставаться специфичными для спутниковой системы);

- использование стандартных транспортных протоколов для пакетной передачи данных (IP и ATM).

Кроме требований вышеприведенных двух групп в перспективных ССС все более важное значение приобретают требования межсетевое взаимодействие. 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-2000.

Ключевые технологии бортовых комплексов

Технологии	Назначение	Уровень реализации в США	Оценка европейского уровня
Многочувствительные антенны	Концентрация мощности сигнала, повторное использование частот, максимизация системной емкости	Коммерчески доступная технология (например, производятся Raytheon для L-диапазона)	Разработаны прототипы и частично испытаны. Обычные многочувствительные антенны разработаны Italsat
Бортовые коммутаторы	Переключение радиоканалов на борту КА	Испытаны в системе Iridium. Планируется для внедрения в большинстве новых ССС	Ограниченные по возможностям прототипы разработаны Alenia Spazio (ESA). Планируется внедрение в системах Euroskyway и MMS WEST для широкополосных мультимедийных услуг. Простые варианты реализованы на борту Hot Bird 4 (Eutelsat) и системе WorldSpace DAB(Alcatel)
Технологии	Назначение	Уровень реализации в США	Оценка европейского уровня
Высокомощные платформы	Обеспечение радиопередачи большой мощности с целью уменьшения габаритов абонентских терминалов	Начато производство 16 кВт платформ	Коммерческие платформы до 10 кВт, разрабатываются 15 кВт платформы (MMS, Aerospatiale)
Большие антенны	Обеспечение в GEO-системах узконаправленных лучей для приема на частотах мобильных терминалов	Коммерчески доступные технологии (например, Harris разработана технология больших антенн для проекта MSAT)	В рамках исследовательских проектов ESA и CNET поведется разработки экспериментальных систем (объем финансирования 40 млн долл.)

Технологии	Назначение	Уровень реализации в США	Оценка европейского уровня
Межспутниковые линии связи	Взаимосоединение между спутниками одной группировки	Разработаны и протестированы в рамках проекта СОИ(SDI). Еще нет коммерческих реализаций на базе оптических технологий	Первое поколение оптических спутниковых линий ISL (InterSatellites Links) разработано в рамках проекта MMS ESA и было испытано в 2000 г. Второе поколение ISL, отвечающее требованиям ССС, находится в ранней стадии НИР/ОКР

К важным телекоммуникационным стандартам общего назначения (для спутникового и наземного сегментов) следует также отнести и протоколы сетевого управления: TMN, TINA, COBRA и др. Необходимо отметить, что тенденция интеграции сетевых технологий и стандартов спутниковых и наземных сегментов становится все более значимой при развитии ССС. При этом наземные протоколы и стандарты будут играть все более определяющую роль в развитии широкополосных спутниковых технологий и мультимедийных услуг.

Спутниковая связь и вещание даже в период мирового экономического кризиса по-прежнему остается коммерчески выгодным видом космической деятельности. За истекшее десятилетие нового века, включая кризисные годы, телекоммуникационная космическая отрасль развивалась динамично и поступательно. Об этом свидетельствует большое количество запусков коммерческих телекоммуникационных спутников в XXI в. За десятилетие на одну только геостационарную орбиту было выведено около двухсот коммерческих спутников различного назначения (фиксированной, подвижной и радиовещательной спутниковой службы), причем более сотни КА была в той или иной мере реализована функция радиовещательной спутниковой службы (непосредственное телевизионное и звуковое вещание). Если в 1990 г. средняя годовая норма запуска составила около 30 спутников в год, то в первые пять лет XXI в. средняя годовая норма запуска упала до 17 КА в год (без учета спутников, потерянных при аварийных запусках). В последующие четыре года она поднялась до 21 КА в год.

По прогнозам, в ближайшие годы мировую космическую индустрию и рынок пусковых услуг ожидает новый подъем после десятилетия относи-

тельного затишья. Это подтверждается следующим фактом. Если в 2005 г. спутниковые операторы заказали производителям 24 геостационарных спутника, в 2006 г. – 28 КА, то в 2009 г. спутниковые операторы заказали производителям уже 41 спутник. При этом 9 из них заказаны компанией Space Systems/Loral; 7 – компанией EADS Astrium; по 5 – компанией Orbital Sciences Corporation и ИСС им. академика М. Ф. Решетнева; по 4 – компаниям Thales Alenia Space и Boeing.

В 2011 г. мировая орбитальная группировка пополнилась 36 телекоммуникационными спутниками. Из них 12 космических аппаратов выведены на низкие орбиты и предназначены для обновления орбитальной группировки системы глобальной подвижной персональной спутниковой связи Globalstar, осуществляемой оператором с 2010 г. Оба лидера глобальной подвижной персональной спутниковой связи – Globalstar и Iridium – заявляют о новых потребительских качествах своих перспективных систем. Однако очевидно, что, объективно уступив в борьбе за мобильного клиента в первом десятилетии нового века технологиям сотовой связи, они так и останутся нишевыми игроками на рынке подвижной персональной связи.

Из 24 спутников связи, выведенных в 2011 г. на геостационарную орбиту, большинство предназначено для работы в традиционных С- и Ku-диапазонах частот. При этом можно отметить интерес операторов спутниковой связи к услугам непосредственного телевизионного и радиовещания во многих регионах мира: Северной Америке, Ближнем Востоке, Северной Африке, Европе, Индокитае. Примечательно, что, наряду с известными мировыми производителями телекоммуникационных космических аппаратов, активность проявляют фирмы Китая и Индии, которыми созданы пять спутников, запущенных на геостационарную орбиту в 2011 г.

Вместе с тем в последние годы четко проявилась тенденция к созданию спутниковых систем, ориентированных, прежде всего, на доступ в сети Интернет и обеспечение высокой пропускной способности. Едва ли не самыми ожидаемыми событиями в мире стали запуски на геостационарную орбиту телекоммуникационных спутников, обеспечивающих высокоскоростной доступ в Интернет частным клиентам и малым офисам (SOHO).

В октябре 2011 г. ракетой «Протон» на геостационарную орбиту был выведен самый мощный по объемам передаваемой информации телекоммуникационный спутник ViaSat-1, предназначенный для предоставления высокоскоростного доступа в Интернет на территории Северной Америки. Предполагается, что услугами этой спутниковой сети воспользуются 1,5 млн жителей США и Канады. ViaSat-1 обеспечивает суммарную передачу данных со скоростью 130 Гбит/с, что превышает возможности всех коммерческих телекоммуникационных спутников над этой территорией.

Следует учитывать, что в данном регионе уже эксплуатируются несколько спутниковых систем, обеспечивающих доступ в Интернет почти миллиону пользователей.

Несколько раньше, в июне 2011 г., компания Eutelsat Comm. ввела в коммерческую эксплуатацию первый европейский телекоммуникационный спутник со сверхвысокой пропускной способностью 70 Гбит/с – космический аппарат SAT. Он был запущен с космодрома «Байконур» 27 декабря 2010 г. и обошелся владельцу около 350 млн евро. Введение спутника в эксплуатацию утроило общую коммерческую мощность компании. Зона покрытия аппарата формируется 82 лучами в Ka-диапазоне частот и включает всю Европу и бассейн Средиземного моря. Владельцы спутника рассчитывают обеспечить высокоскоростным доступом в Интернет клиентов.

Современные технологии позволяют создавать телекоммуникационные космические аппараты с бортовыми ретрансляционными комплексами, обеспечивающими пропускную способность около 100 Гбит/с. Однако ожидается, что в скором времени технологические возможности позволят передавать информацию со скоростью свыше одного терабита в секунду. При этом стоимость одного гигабита передаваемой информации будет неуклонно снижаться. Тем самым создаются условия конвергенции услуг высокоскоростного доступа в Интернет через спутниковые и наземные сети связи.

Спутниковая связь на массовых рынках персональной мобильной связи, где общее число абонентов составляет более 1 млрд человек, будет использоваться достаточно ограниченно: количество пользователей – 2–3 % от числа абонентов наземных мобильных сетей; трафик спутниковых сетей – 1–2 % от общего трафика мобильной связи. Поэтому важное значение для перспективных ССС приобретают вопросы интеграции с наземными сетями связи. Существует ряд важных прикладных задач, где спутниковая связь может эффективно дополнять возможности наземных сетей за счет высокоэкономичной реализации массовых услуг. К таким приложениям в первую очередь относятся высокоскоростной широкополосный доступ к Интернету и широкоэмитательное распространение мультимедийной информации.

Перспективные ССС в технологическом плане будут характеризоваться:

- многообразием применяемых конфигураций спутниковых систем;
- многообразием применяемых радиоинтерфейсов, часть которых, возможно, в ближайшие годы будет стандартизирована Международным союзом электросвязи;

- более широким использованием высокочастотных радиоресурсов (в полосах Ku, Ka и др.);
- развитием режимов коммутации каналов/пакетов и маршрутизации трафика в спутниковых сегментах ССС;
- использованием новых версий протоколов TCP/IP и ATM, адаптированных к спутниковым каналам как для управления графиком в спутниковом сегменте, так и для все более эффективной интеграции с наземными подсетями Интернета;
- переходом к современным стандартам обработки и распространения мультимедийной информации (MPEG-4, DVB, IP-протоколы);
- применением широкой гаммы мобильных спутниковых терминалов, от простых и дешевых до мультимедийных терминалов, обеспечивающих доступ к услугам Интернета.

Ключевыми свойствами перспективных ССС будут являться функциональные возможности и технические решения, которые обеспечат применения спутниковой связи в массовых сегментах рынка, где наибольшее значение имеют факторы глобальности услуг, конвергенции абонентских сервисов и мультимедийности информации. К таким ключевым свойствам ССС относятся:

- экономичная реализация высокоскоростных услуг (доступ к Интернету, мультимедийное вещание, корпоративные интранет-сети);
- глобальная мобильная связь для вертикальных рынков (нефтяные и газодобывающие отрасли, морской транспорт, экологический мониторинг, автотранспортные перевозки, системы безопасности для распределенных объектов);
- эффективная организация служб спутниковой навигации, интегрированных с новыми приложениями мобильной связи (автомобильные телематические услуги, срочные медицинские услуги, персональная локализация на местности, мобильные путеводители и справочники);
- непосредственная (прямая) доставка мультимедийной информации по принципу DTH (Direct to Home) в различные абонентские пункты (домашние квартиры, учебные классы, офисы, конференц-залы, транспортные терминалы и др.).

Перспективные ССС будут фокусироваться на следующих классах услуг:

- цифровое телевещание;
- высокоскоростные корпоративные услуги связи;
- персональные услуги связи;
- онлайн-интерактивные службы;
- распределительные сети мультимедийной информации.

В каждом классе услуг спутниковая связь способна обеспечить более высокое качество сервиса при сопоставимой стоимости по сравнению с

наземными сетями. Высокое качество сервиса будет достигаться за счет широкополосности каналов, экономичности абонентских станций и простых пользовательских интерфейсов.

Все более важным фактором создания ССС нового поколения является международное сотрудничество. Международные проекты успешно выполняются на всех фазах «жизненного цикла» – научные исследования, конструкторские разработки, совместные эксперименты, стандартизация и внедрение систем спутниковой связи. Для Беларуси международная кооперация открывает широкие возможности создания ССС нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

Банкет, В. Л. Цифровые методы в спутниковой связи / В. Л. Банкет, В. М. Дорофеев. М., 1988.

Системы спутниковой связи : учеб. пособие для вузов / под ред. Л. Я. Кантора. М., 1992.

Радиотехнические системы передачи информации : учеб. пособие для вузов / под ред. В. В. Калмыкова. М., 1990.

Спилкер, Дж. Цифровая спутниковая связь / Дж. Спилкер. М., 1979.

Чернявский, Г. М. Орбиты спутников связи / Г. М. Чернявский, В. А. Бартенев. М., 1978.

Калашников, Г. М. Системы связи через искусственные спутники Земли / Г. М. Калашников. М., 1969.

Крэсснер, Г. Н. Введение в системы космической связи / Г. Н. Крэсснер, Дж. Михаэле. М., 1967.

Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. М., 2003.

Регламент радиосвязи. М., 1985. Т. 1.

Радиорелейные и спутниковые системы передачи : учеб. для вузов / под ред. А. С. Немировского. М., 1986.

Рекомендации и отчеты МККР. Т. 4. Ч. 1. Фиксированная спутниковая служба. Дубровник, 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ВИДЫ РАДИОСВЯЗИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ. МЕСТО И РОЛЬ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ	5
2. СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ	11
2.1. Классификация, назначение, виды и основные характеристики спутниковых систем связи	11
2.2. Геостационарные спутниковые системы связи	18
2.3. Средневысотные спутниковые системы связи	20
2.4. Низкоорбитальные спутниковые системы связи	22
3. СОСТАВ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И СРЕДСТВ ВЫВОДА НА ОРБИТУ	27
3.1. Наземный сегмент	27
3.2. Космический сегмент	29
3.3. Сегмент средств вывода спутников на орбиту	34
3.4. Основные показатели систем спутниковой связи в целом	36
4. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК	38
4.1. Вычисление координат космического аппарата на моменты обсервации по элементам орбиты для невозмущенного движения	42
4.2. Расчет зоны покрытия	43
5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ	48
5.1. Основные энергетические уравнения спутниковых радиолиний	48
5.2. Краткая характеристика факторов, влияющих на энергетику спутниковых систем связи и диапазоны частот спутниковых линий	53
5.3. Влияние шумов искусственного происхождения на чувствительность приемника	58

6. БОРТОВЫЕ РЕТРАНСЛЯТОРЫ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ	61
6.1 Требования к бортовым ретрансляторам и их шумовые характеристики.....	61
6.2 Виды бортовых ретрансляторов и структура их построения	65
7. ЗЕМНЫЕ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ	74
8. СЕТИ СТАНЦИЙ VSAT	78
9. СИСТЕМЫ ПЕРСОНАЛЬНОЙ ПОДВИЖНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ	83
9.1. Низкоорбитальная система связи Iridium	88
9.2. Низкоорбитальная система связи Globalstar	96
10. РЕГИОНАЛЬНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ	104
11. ГЕОСТАЦИОНАРНАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ INMARSAT	110
12. СРЕДНЕОРБИТАЛЬНАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ ODYSSEY	115
13. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ	119
13.1. Влияние методов передачи сигналов на энергетический бюджет спутниковой радиолинии	119
13.2. Способы многостанционного доступа в спутниковые системы связи.....	122
13.3. Методы модуляции и кодирования в спутниковых системах связи..	129
13.4. Сравнение свойств сигналов с фазовой модуляцией (ФМ) и амплитудно-фазовой модуляцией (АФМ)	135
14. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ	138
ЛИТЕРАТУРА	145

Учебное издание

Аэрокосмические технологии

Абламейко Сергей Владимирович
Саечников Владимир Алексеевич
Спиридонов Александр Александрович

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

**Пособие для студентов факультетов
радиофизики и компьютерных технологий,
механико-математического и географического**

Редактор *Н. Ф. Акулич*

Художник обложки *Т. Ю. Таран*

Технический редактор *Т. К. Раманович*

Компьютерная верстка *О. В. Гасюк*

Корректор *М. А. Подголина*

Подписано в печать 21.12.2012. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,6. Уч.-изд. л. 8,2.

Тираж 100 экз. Заказ 92.

Белорусский государственный университет.

ЛИ № 02330/0494425 от 08.04.2009.

Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.

Республиканское унитарное предприятие

«Издательский центр Белорусского государственного университета».

ЛП № 02330/0494178 от 03.04.2009.

Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.