



Книги, публикуемые в серии «Мир радиозлектроники», содержат актуальную научную и технологическую информацию и, несомненно, будут полезны специалистам радиозлектронного комплекса при реализации государственной программы «Развитие электронной и радиозлектронной промышленности на 2013—2025 годы».

*Директор департамента
радиозлектронной промышленности
Минпромторга России В.В. Шнак*



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Шпак Василий Викторович, директор Департамента радиоэлектронной промышленности
Минпромторга РФ – председатель редсовета

Члены совета:

Авдонин Борис Николаевич, советник директора ФГУП «МНИИРИП», д.э.н., профессор, г. Москва

Акопян Иосиф Григорьевич, АО «МНИИ «Агат», д.т.н., профессор, г. Москва

Анцев Георгий Владимирович, ген. директор – ген. конструктор АО «Концерн
«Моринформсистема-Агат», г. Москва

Беккиев Азрет Юсупович, зам. ген. директора холдинговой компании «Росэлектроника», д.т.н.,
профессор, г. Воронеж

Белый Юрий Иванович, ген. директор АО «НИИП им. В.В. Тихомирова», г. Жуковский

Боев Сергей Федотович, генеральный директор ПАО МАК «Вымпел», лауреат Государственной
премии, д.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Борисов Юрий Иванович, заместитель председателя правительства РФ, д.т.н., г. Москва

Букашкин Сергей Анатольевич, АО «Концерн «Автоматика», д.т.н., профессор, г. Москва

Бушуев Николай Александрович, советник ген. директора АО «НПП «Контакт», к.ф.-м.н., д.э.н.,
профессор, г. Саратов

Верба Владимир Степанович, ген. конструктор АО «Концерн радиостроения «Вега»,
чл.-корр. РАН, г. Москва

Верник Петр Аркадьевич, директор АНО «Институт стратегий развития», г. Москва

Вилкова Надежда Николаевна, ген. директор ЗАО «МНИТИ», к.т.н., д.э.н., профессор, г. Москва

Гуляев Юрий Васильевич, научный руководитель ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
академик РАН, г. Москва

Зверев Андрей Владимирович, советник заместителя председателя правительства РФ, к.э.н.,
г. Москва

Козлов Геннадий Викторович, заместитель руководителя аппарата генерального
директора-руководитель секретариата АО "Концерн ВКО "Алмаз-Антей", д.т.н., профессор,
г. Москва

Красников Геннадий Яковлевич, ген. директор АО «НИИМЭ», академик РАН, г. Москва,
г. Зеленоград

Критенко Михаил Иванович, госкорпорация «Ростех», к.т.н., г. Москва

Мальцев Петр Павлович, научный руководитель ИСВЧПЭ РАН, д.т.н., профессор, г. Москва

Минаев Владимир Николаевич, заместитель ген. директора по стратегическому развитию
ФГУП «МКБ «Электрон», д.т.н., профессор, г. Москва

Муравьев Сергей Алексеевич, к.т.н., с.н.с., г. Москва

Попов Владимир Васильевич, президент ПАО «Светлана», к.т.н., г. Санкт-Петербург

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, президент МГТУ МИРЭА, г. Москва

Суворов Александр Евгеньевич, советник ген. директора ФГУП «МКБ «Электрон», г. Москва

Турилов Валерий Александрович, ген. директор АО «КНИИТМУ», к.т.н., доцент, г. Калуга

Федоров Игорь Борисович, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана, академик РАН, д.т.н., профессор,
г. Москва

Хохлов Сергей Владимирович, ген. директор ФГУП «ГосНИИАС», г. Москва

Чаплыгин Юрий Александрович, президент Национального исследовательского университета
«МИЭТ», чл.-корр. РАН, г. Москва, г. Зеленоград

Шахнович Илья Владимирович, главный конструктор ООО «НИИИТ», г. Москва

Шубарев Валерий Антонович, президент ОАО «Авангард», д.т.н., профессор, г. Санкт-Петербург

Якунин Александр Сергеевич, ген. директор АО «Воентелеком», к.т.н., г. Москва



МИР радиоэлектроники

Д. Миноли

Инновации в технологиях
спутниковой связи

перевод с английского
Е.Б. Махияновой

под редакцией
А.А. Шашкова

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2019



*Издание осуществлено при поддержке
Филиала АО «ОРКК» – «НИИ КП»*

УДК 621.39

ББК 32.85

М61

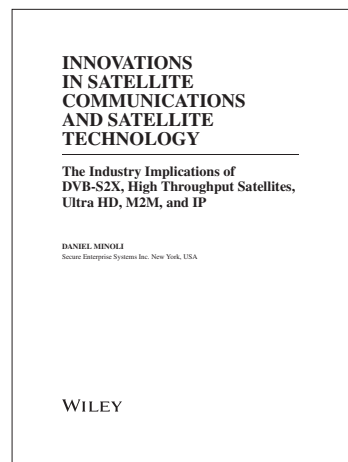
М61 Миноли Д.

Инновации в технологиях спутниковой связи

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 446 с., ISBN 978-5-94836-545-9

Книга является обзором ключевых достижений в области коммерческой спутниковой связи. В ней ставится вопрос о том, какими могут быть новые возможности для конечных пользователей и поставщиков услуг в использовании новейших быстроразвивающихся инноваций в этой области (расширение спецификации DBV-S2 (DVS-S2X)), технологий спутниковых каналов с высокой пропускной способностью (HTS, High throughput satellite), методов спутникового применения решений M2M (machine-to-machine) и т.д.).

Издание можно считать справочным пособием, так как в вводную главу включен справочный технический материал, который будет служить в качестве учебника по спутниковой связи для начинающих.



УДК 621.39

ББК 32.85

Copyright © 2015 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved

Все права защищены. Данный перевод публикуется под лицензией

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление, 2019

ISBN 978-5-94836-545-9

ISBN 978-1-118-98405-5 (англ.)

Содержание

Предисловие редактора перевода	9
Предисловие	11
Благодарности	13
Об авторе	14
Глава 1	
Введение	17
1.1. Общие сведения	17
1.2. Проблемы и возможности отрасли: развивающиеся тенденции	22
1.2.1. Проблемы и возможности	22
1.2.2. Тенденции развития технологий	27
1.3. Основы спутниковой связи.....	34
1.3.1. Спутниковые орбиты	34
1.3.2. Диапазоны частот спутниковой ретрансляции данных	41
1.3.3. Восстановление спутникового сигнала	52
1.3.4. Передающая сеть спутниковой связи.....	54
1.4. Приложения спутниковой связи.....	59
1.5. Обзор рынка спутниковой связи	64
1.6. Каково направление развития оптоволоконной связи?.....	67
1.7. Потребность в инновациях	69
Литература	70
Глава 2	
Модуляционные расширения DVB-S2 и другие достижения	73
2.1. Часть 1: обзор принципов модуляции и упреждающей коррекции ошибок.....	74
2.1.1. Концепции E_b/N_0	74
2.1.2. Основы FEC.....	77
2.1.3. Фильтры и коэффициенты сглаживания.....	87
2.2. Часть 2: DVB-S2 и расширения DVB-S2	93
2.2.1. Модуляция DVB-S2	93
2.2.2. Расширения DVB-S2.....	99
2.3. Часть 3: Другие достижения наземных приложений	107
2.3.1. Идентификатор оператора связи	107
2.3.2. Интеллектуальное инверсное мультиплексирование.....	109
2.3.3. Значение H.265 кодирования	114



Литература	116
Глава 3	
Спутники с высокой пропускной способностью (HTS) и технологии использования сфокусированных лучей в Ка- и Ку-диапазонах	118
3.1. Введение	123
3.2. Схемы множественного доступа и повторное использование частот	125
3.3. Использование сфокусированных лучей	130
3.4. Цвета частот	135
3.5. Эксплуатационные полосы частот	143
3.6. Рассмотрение вопросов затухания сигналов во время дождя	148
3.7. Приложения HTS	151
3.8. Сравнение подходов	155
3.9. Обзор HTS-систем Ку-диапазона	157
3.10. Конструктивные соображения относительно HTS	162
3.11. Основы проектирования узконаправленных антенн (спутниковых антенн)	163
3.11.1. Антенны с одним облучателем на луч	167
3.11.2. Антенны с несколькими облучателями на луч	168
3.12. Примеры HTS	170
3.12.1. ViaSat-1 и -2	172
3.12.2. EchoStar	175
3.12.3. Eutelsat KA-SAT	178
3.12.4. Intelsat EPIC	179
3.12.5. Global	181
3.12.6. Другие традиционные HTS	181
3.12.7. O3b	183
3.12.8. Широкополосная глобальная спутниковая связь (WGS)	187
Литература	188
Глава 4	
Услуги авиационной связи с подвижными объектами	191
4.1. Обзор использования связи с подвижными объектами на транспорте	191
4.2. Авиационные системы связи	196
4.2.1. Тенденции рынка	196
4.2.2. Технологические подходы к авиационной связи	198
4.2.3. Технология создания антенн для авиационной связи и вопросы правового регулирования	205
4.2.4. Технология создания терминалов	209
4.2.5. Пример проектирования антенн (ViaSat)	210
4.2.6. Формирование луча и наземные системы формирования луча (GBBF — Ground-Based Beam Forming)	221

4.3. Основные участники рынка и подходы в сфере рассматриваемой технологии	225
4.3.1. Поставщики спутниковой инфраструктуры	225
4.3.2. Поставщики услуг на линии «воздух–земля» для авиакомпаний....	232
Литература	238

Глава 5

Услуги морской связи и другие услуги связи с подвижными объектами..... 240

5.1. Подходы к осуществлению морской связи	240
5.2. Ключевые участники рынка	246
5.2.1. Inmarsat	246
5.2.2. ViaSat/KVH	246
5.2.3. Intelsat.....	247
5.2.4. O3b.....	247
5.3. Приложения Comms-On-The-Move (связь в движении)	249
5.4. Транспортальные системы HTS/Ка-диапазона	251
Литература	255

Глава 6

Разработки и спутниковые приложения связи M2M 256

6.1. Общий обзор интернета вещей и связи M2M.....	256
6.2. Структура M2M	269
6.3. Примеры приложений связи M2M и их поддержка спутниковой связью	277
6.3.1. Примеры общих приложений	278
6.3.2. Роли, контекст и приложения для спутников.....	291
6.3.3. Антенны для приложений спутниковой связи M2M.....	292
6.3.4. Возможности рынка связи M2M для спутниковых операторов ..	293
6.3.5. Основные участники рынка и подходы спутниковой отрасли ...	301
6.4. Конкурентные беспроводные технологии.....	321
6.4.1. Универсальная система мобильной связи (UMTS).....	329
6.4.2. Долгосрочное развитие сетей связи (LTE)	329
Литература	332

Глава 7

Видео и телевидение ультравысокой четкости и приложения спутниковой связи 335

7.1. Стандарт H.265 в контексте Ultra HD	336
7.2. Требования к полосе пропускания/передаче	352
7.3. Наземное распределение сигналов	355
7.4. Спутниковое распределение сигналов	356
7.5. Гибридное распределение сигналов	358
7.6. Проблемы развития, расходы, восприятие	358
Литература	359



Глава 8

Спутниковые технологии: электрические ракетные двигатели и пусковые платформы 360

- 8.1. Основные технологии и подход к разработке электрических ракетных двигателей 361
- 8.2. Электрические ракетные двигатели 369
 - 8.2.1. Ионные двигатели 370
 - 8.2.2. Двигатели на эффектах Холла 370
 - 8.2.3. Магнитоплазмодинамический двигатель 373
- 8.3. Преимущества и недостатки использования работы спутников только на ЭРД 374
- 8.4. Основные данные о точке стояния спутника на ГСО 378
- 8.5. Подходы к производству спутников с ЭРД 382
- 8.6. Новые подходы и участники рынка пусковых платформ 384
 - 8.6.1. Space Exploration Technologies Corporation (SpaceX) 384
 - 8.6.2. Sea Launch («Морской старт») 385
 - 8.6.3. Традиционные пусковые платформы 385

Приложение 8А

Стоимость транспондеров 388

- 8А.1. Типичные расходы на продажу, общие и административные расходы (SG&A) и EBITDA для промышленности в целом и компаний спутниковой связи 388
- 8А.2. Стоимость транспондеров 394
- Литература 396

Приложение А

Список некоторых патентов на системы для спутников связи со сфокусированными лучами и многолучевых спутников связи 398

- Литература 402

Приложение В

Глоссарий основных концепций и терминов спутниковой связи 404

Предметный указатель 434

Предисловие редактора перевода

Предлагаемая книга — перевод с английского языка — представляет собой обзор достижений в области коммерческой спутниковой связи и содержит некоторые сведения о средствах выведения спутников связи, в том числе российских космических аппаратов (КА) типа «Молния», сведения об особенностях выведения КА с использованием ракеты-носителя «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М» и других. Работа по подготовке оригинального издания этой книги на английском языке относится к 2015 году, по этой причине и упомянутый обзор заканчивается тем же годом. Понятно, что после 2015 года развитие спутниковой связи в мире не прекратилось. В частности, за этот период времени в Германии и других странах осуществлен переход от аналогового телевидения к цифровому телевидению высокой четкости. В России такой переход начат 15 апреля 2019 года.

Так как книга имеет ярко выраженный уклон в сторону освещения коммерческой стороны использования спутниковой связи, то и терминология, используемая в книге, несет на себе соответствующий оттенок. При работе с переводом редактор посчитал излишним введение толкования некоторых используемых в книге терминов («инновации», «терминал» и др.), полагая эти термины общезвестными, смысл которых читатель может почерпнуть из других источников.

Вводная глава содержит справочный технический материал, который может быть полезен инженерам по спутниковой связи вне зависимости от остального содержания книги. В частности, в этой главе приведены сведения о наименованиях радиодиапазонов, используемых в спутниковой связи, а также околоземных орбит спутников космической связи (не только геостационарных).

В книге содержатся термины из словаря радиоинженеров и специалистов по баллистике, которые могут оказаться непонятными для отечественных «провайдеров». По этой причине при переводе на русский язык в тексте книги приведены подстрочные примечания, уточняющие суть некоторых использованных терминов из словаря радиоинженеров: «повторное использование частот» (фактически — одновременное в непересекающихся лучах), транспондер, офсетная антенна и др.

В русском переводе книги в подстрочных примечаниях раскрыто содержание некоторых использованных терминов из словаря программистов-компьютерщиков (веб-страницы, браузер, утилита, стек, хаб и др.).

Первое использование в книге аббревиатур на английском языке сопровождается переводом на русский язык, в дальнейшем в тексте аббревиатуры используются без пояснений. Для удобства читателей в издании на русском языке в приложении В приведен Глоссарий основных концепций и терминов спутниковой связи. Он создан на основе различных источников в ограниченном объеме информации с приведением ссылок на эти источники. На стр. 434–445 приведен «Предметный указатель использованных в книге терминов и аббревиатур» с указанием номера страницы с первым упоминанием термина в книге.

Книга содержит 8 глав, перечни источников, малодоступных рядовому русскоязычному читателю (исключительно на английском языке), три приложения и предметный указатель. Чтение книги рекомендуется начать с ознакомления с основными терминами спутниковой связи (см. Приложение В, стр. 404).

Руководитель филиала
АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» —
«Научно-исследовательский институт космического приборостроения»
Шашков Алексей Алексеевич

Посвящается Анне
и моим родителям Джино и Анжеле

Предисловие

В последние несколько лет был отмечен ряд технических и эксплуатационных достижений, влияющих на коммерческое приложение спутниковой связи. В этой книге рассматриваются некоторые из этих новых ключевых достижений, а также последствия и/или возможности их внедрения для конечных пользователей и поставщиков подобных услуг. Спутниковая связь играет и будет продолжать играть ключевую роль в коммерческих, TV/СМИ, правительственных и военных коммуникациях вследствие своих возможностей многоадресности/широковещания, предоставления услуг мобильной связи, глобального охвата, надежности и способности быстро поддерживать обеспечение связи в открытом космосе и/или враждебном окружении.

Бизнес-факторы, влияющие на отрасль в настоящее время, включают в себя стремление к более высокой пропускной способности каналов связи и более экономически эффективному использованию частотной полосы пропускания. Улучшенные методы модуляции позволяют пользователям повысить скорость передачи данных каналов за счет использования таких методов, как 64APSK (amplitude-phase shift keying — амплитудно-фазовая манипуляция). Высокая пропускная способность также достигается за счет использования узконаправленного луча в Ka (и Ku)-диапазоне на *спутниках с высокой пропускной способностью* (HTS — High Throughput Satellites), а также с помощью сокращения задержки передачи (благодаря пакету протоколов высокого уровня по установлению связи) с использованием спутников на средневысотной околоземной орбите (MEO — Medium Earth Orbit) высотой 8 тыс. км над экватором (их также называют MEO-HTS), но там, где пользователи должны использовать две перенацеливаемые антенны для отслеживания космических аппаратов и сохранить возможность соединения путем перемещения по пути от одного спутника в созвездии (группировке) к другому.

Предоставление услуг людям, постоянно пребывающим в разъездах, особенно во время заокеанских перелетов, в настоящее время технически осуществимо и финансово выгодно для заинтересованных поставщиков услуг. Подключение M2M (машина-машина), будь то грузовые автомобили во время трансконтинентальных рейсов или агрегация телеметрии самолетов в режиме реального времени, или отслеживание данных отправленных товаров, открывает новые возможности для расширения *интернета вещей* (IoT — Internet of Things) до далеко распределенных в пространстве объектов, особенно в океанических условиях. Зарождающееся цифровое телевидение сверхвысокой четкости (UHDTV — Ultra High Definition Television) обеспечивает качественное видеоизображение, которое эквивалентно 8–16 экранам, принимающим телевизионный сигнал высокой четкости (HDTV — High Definition Television) (33 млн пикселей, для разрешения в 7680×4320), по сравнению с максимум 2 млн пикселей (разрешение 1920×1080) для услуг HDTV текущего высокого качества, отсюда становится ясно, что это требует гораздо более высокой пропускной способности. В перспективе на 2020 г.

операторы спутниковой связи планируют позиционировать свои услуги в этом сегменте рынка как общедоступные услуги широкого вещания и производить более таргетированные передачи, начиная с момента публикации этой книги.

На уровне базовой технологии ведутся разработки электрических (вместо химических) двигателей; такие подходы к разработке двигателей способны уменьшить вес космических аппаратов (и, следовательно, стоимость запуска) и, возможно, продлить срок службы космического аппарата. Кроме того, на рынок выходят новые *пусковые платформы*, имеющие цель снижения стоимости запуска космических аппаратов за счет увеличения конкуренции.

Спутниковые сети не могут реально существовать (вечно) в качестве автономных островов в море соединений, следовательно, важную роль продолжают играть гибридные сети. Широкое внедрение услуг на базе IP-сервисов, в том числе телевидения на основе IP (IPTV) и предоставление видеослужб через интернет (OTT — Over The Top), движимое продолжающимся развертыванием оптоволоконной связи, в конечном итоге произведут преобразование отрасли. В частности интернет-протокол, версия 6 (IPv6) представляет собой технологию, которая в настоящее время развертывается в различных частях мира, что позволяет производить истинную явную адресацию между оконечными устройствами. По мере роста числа интеллектуальных систем, которым требуется прямой доступ, до нескольких миллиардов (включая смартфоны, планшеты, приборы, датчики/исполнительные элементы и даже носимые на теле биометрические устройства) в итоге протокол IPv6 становится институциональным императивом. Интеграция спутниковой связи и возможностей протокола IPv6 обещает создать мощную сетевую инфраструктуру, которая может служить для удовлетворения растущих потребностей правительства, армии, IPTV и крупных игроков на рынке мобильного видео. И это далеко не все заинтересованные стороны.

Эта книга рассматривает подобные темы развивающихся технологий и предлагаемых ими возможностей. После вводного обзора в главе 2 обсуждаются достижения в области методов модуляции, таких как расширение DBV-S2 (DVB-S2X). Технологии работы узконаправленного главного лепестка (не только в Ka-, но и в Ku-диапазоне), которая составляет техническую основу новых систем и услуг HTS, обсуждаются в главе 3. Услуги авиационной мобильной связи, такие как интернет во время полета, рассматриваются в главе 4. Мобильная связь при морских путешествиях и другие виды наземной мобильной связи рассматриваются в главе 5. Приложения M2M исследуются в главе 6. Развивающиеся технологии получения изображений сверхвысокой четкости (Ultra HD) оцениваются в главе 7. И, наконец, новые космические технологии, в частности, электрический двигатель и новые *пусковые платформы*, которые в конечном счете способны привести к более низкой стоимости передачи бита (или стоимости за МГц), обсуждаются в главе 8.

Эта работа будет представлять интерес для инвесторов в технологии, планировщиков-операторов спутниковой связи, транспортных операторов и поставщиков услуг связи, руководителей службы дальней связи, профессиональных логистиков, инженеров-разработчиков оборудования, интеграторов технологий; провайдеров интернет-услуг (ISP — Internet Service Providers), телекоммуникационных компаний, а также провайдеров услуг беспроводной связи как внутри страны, так и в остальном мире.

Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить Уильяма Б. Макдональда, президента WBMSAT Satellite Communications Consulting (Порт Орчард, штат Вашингтон, США) за просмотр, предоставление вводной информации и руководство при написании этого текста. WBMSAT проводит исследования, разработку систем, проектирование, интеграцию, тестирование и управление проектами во всех аспектах коммерческой и военной спутниковой связи.

Также автор хотел бы поблагодарить Эдуарда Д. Горовица за ценный вклад. Э.Д. Горовиц является соучредителем и директором U.S. Space LLC, компании, предоставляющей услуги спутниковой связи, и председателем ViviSat, компании, занятой орбитальным обслуживанием спутников. Недавно Э.Д. Горовиц вошел в управляющий совет при генеральном директоре Encompass Digital Media, ведущего провайдера мировых телеканалов, прямых спортивных трансляций и новостных агентств, цифровых средств массовой информации и государственных услуг.

Тем не менее любое критическое мнение, описание перспектив, ограничений, а также возможные неясности или отсутствие полной ясности в этой работе следует отнести на долю автора.

Об авторе

Дэниел Миноли имеет многолетний производственный и управленческий опыт в области планирования, проектирования, развертывания и обеспечения безопасности IP/IPv6-, телекоммуникационных, беспроводных, спутниковых и видеосетей для лучших на мировом рынке провайдеров услуг связи и финансовых компаний. В настоящее время он является главным техническим директором *Secure Enterprise Systems* (www.ses-engineering.us), фирмы, деятельность которой посвящена проектированию и разработке, оценке технологий, а также обеспечению кибербезопасности больших предприятий. Предыдущими должностями, которые в последние два десятилетия занимал Д. Миноли, являются: главный менеджер и директор Ground Systems Engineering в *SES*, втором по величине в мире поставщике услуг спутниковой связи, директор сетевой архитектуры в *Capital One Financial*, главный технический директор в *InfoPort Communication Group*, и вице-президент по оказанию пакетных услуг в *Teleport Communications Group (TCG)* (в конечном счете эта компания была приобретена компанией AT&T).

В недавнем прошлом он был ответственен (I) за разработки, инжиниринг и развертывание Ethernet в метро, IP/MPLS (Multi-Protocol Label Switching — технология коммутации пакетов в многопротокольных сетях на базе меток) и сетей VoIP (Voice over Internet Protocol — *передача голоса/речи через интернет*/VoMPLS (передача голоса и речи с помощью технологии MPLS), (II) разработку, проектирование и внедрение гибридного IPTV (Internet Protocol Television — интернет-телевидение), нелинейных и 3DTV-видеосистем, (III) развертывание десятка антенн с большой апертурой (7–13 м) для телепортов в США и за рубежом; (IV) развертывание услуг спутникового мониторинга по всему миру (более 40 мест); (V) разработку, инжиниринг и внедрение услуг на основе протокола IPv6 в сфере M2M/интернета вещей, в области нелинейного видео, эксплуатации смартфонов, в спутниковой области, а также в области сетевой безопасности; и (VI) развертывание инфраструктуры облачных вычислений (Cisco UCS — 3800 серверов) для поставщика услуг кабельного ТВ из первого звена в США. Некоторые из работ Д. Миноли, посвященные спутниковой и беспроводной связи, IP, видео и интернету вещей, представлены в книгах, принадлежащих его перу:

- *Satellite Systems Engineering in an IPv6 Environment* (Francis and Taylor, 2009),
- *Wireless Sensor Networks* (Wiley 2007),
- *Hotspot Networks: Wi-Fi for Public Access Locations* (McGraw-Hill, 2002),
- *Mobile Video with Mobile IPv6* (Wiley, 2012),
- *Linear and Non-Linear Video and TV Applications Using IPv6 and IPv6 Multicast* (Wiley, 2012), и
- *Building the Internet of Things with IPv6 and MIPv6* (Wiley, 2013).

Дэниел Миноли выступал учредителем при запуске двух компаний посредством бизнес-инкубатора высоких технологий *Leading Edge Networks Inc*, которой он открыл в начале 2000-х годов: *GlobalWireless Services*, поставщика точек доступа безопасного широкополосного мобильного интернета и услуг VoIP, а также

InfoPort Communications Group, столичного оператора оптоволоконной связи и гигабитного Ethernet, осуществляющего техническую поддержку Центра обработки данных/SAN/расширения канала и услуги сетевого доступа к облачным ресурсам.

Автор этой книги также вел колонки для журналов *ComputerWorld*, *NetworkWorld* и *Network Computing* (1985–2006). Он преподавал в *Нью-Йоркском университете* (Институте информационных технологий), *Университете Рутгерса* и *Технологическом институте Стивенса* (1984–2003). Кроме того, Д. Миноли выступал независимым аналитиком технологий для Gartner/DataPro (1985–2001); на основе обширного практического опыта работы в финансовых фирмах и компаниях-операторах мобильной связи он отслеживал развитие технологий и писал подробные технические отчеты на уровне директора службы дальней связи и информационных технологий в области телефонии и систем передачи данных, в том числе освещая темы безопасности, аварийного восстановления/обеспечения непрерывности работы бизнеса, управления сетью, локальных сетей, сетей беспроводного доступа (WAN — Wireless Access Network) (ATM, IPv4, MPLS, IPv6), беспроводных средств связи (локальные сети, общественные точки доступа, беспроводные сенсорные сети, 3G/4G и спутниковое телевидение), VoIP, сетевого дизайна/экономики, сетей операторов связи (например, Ethernet в метро и мультиплексирование с грубым разделением по длине волны/с плотным разделением по длине волны (CWDM — Coarse wavelength-division multiplexing)/(DWDM — Dense Wavelength Division Multiplexing)) и электронной коммерции. В течение нескольких лет он был председателем по разработке технической программы сессий, затем семинаров, а теперь всей конференции IEEE ENTNET (Enterprise Networking — создание корпоративной сети); ENTNET фокусируется на требованиях корпоративных сетей для крупных финансовых компаний и других корпоративных институтов (эта группа IEEE в настоящее время объединена и стала Техническим комитетом IEEE по информационной инфраструктуре [TCIPN — Technical Committee on Information Infrastructure]).

Д. Миноли выступал в качестве свидетеля-эксперта в (успешном) иске на 11 млрд долларов, касающемся услуг беспроводной VoIP-системы радиосвязи воздух-земля в салоне самолета, а также в большом судебном процессе, связанном с цифровым сканированием и передачей банковских документов/инструментов (в частности, отсканированных чеков). Д. Миноли был задействован в качестве технического эксперта в ряде судебных процедур по поводу нарушения патентных прав в области цифровой обработки изображений, VoIP, межсетевых экранов и юридических фирм, осуществляющих поддержку космических VPN (виртуальных частных сетей), в том числе *Schiff Hardin LLP*, *Fulbright & Jaworski LLP*, *Dimock Stratton LLP/Smart & Biggar LLP*, *Munger, Tolles, and Olson LLP* и *Baker & McKenzie LLP*.

На протяжении многих лет автор этой книги консультировал венчурные компании относительно инвестиций в десяток высокотехнологичных компаний. Он выполнил обширные технические, продажные и маркетинговые аналитические исследования высокотехнологичных фирм, ищущих финансирование на общую сумму около 150 млн долларов, развивающих мультимедиа, цифровое видео, коммутацию на физическом уровне, малые терминалы спутниковой связи узкой направленности (VSAT — Very Small Aperture Terminal), телемедицину, интеграцию телефонных систем с компьютерами (CTI — Computer Telephony Integration)

на основе Java, VoFR & VPN, HDTV, оптические чипы, H.323 шлюзы, нанопроизводство/беспроводной уровень квантовых каскадных лазеров (QCL — Quantum Cascade Laser) и сети управления телекоммуникациями (TMN — telecommunication management network). Следует упомянуть и достижения в следующих направлениях: *мобильная радиосвязь* (MRC — *mobile radio communications*) — мультимедиа и асинхронный режим передачи; *NHC* — коммутация на физическом уровне; *CoastCom* — системы *VSAT*; *Cifra* — телемедицина; *Uniforce* — СТИ на основе Java IP; *Memotec* — VoFR; *Miranda* — HDTV и электронное кино; *Lumenon* — оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM — Wavelength Division Multiplexing); *Medisys* — активный протокол обмена сигналами (ASP — Active Signaling Protocol) для *здравоохранения* на основе сети интернет; *Tri-Link* — H.323 VoIP шлюз; *Maxima* — беспроводная оптическая метро-сеть в пространстве свободного распространения сигналов с использованием квантовых каскадных лазеров (QCL — Quantum Cascade Laser), изготовленных методами нанотехнологий; и, *ACE*COMM* (*связь с асинхронным методом передачи — Auxiliary Control Element*) для TMN / IPDR (*финансисты/венчурный капитал — Societe' General de Financement de Quebec; Caisse de Depot et Placement Quebec; Les Funds De Solidarite' Des Travailleurs*).

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые системы, охватывающие своими услугами коммерческую, военную сферы и дистанционное зондирование Земли (включая сбор сведений о погоде), предлагают важные глобальные возможности подключения и наблюдения, которые в современном мире уже сейчас воспринимаются как незаменимые. Будь то поддержка мобильной связи в виде доступа к интернету и телеметрия в режиме реального времени с самолетов и морских судов на океанских маршрутах или распространение высококачественного развлекательного видео на рассредоточенных территориях развивающихся стран без значительной наземной инфраструктуры, или экстренная связь в неблагоприятных условиях или отдаленных районах, или приложения для отображения земной поверхности либо театра военных действий с помощью беспилотных летательных аппаратов и спутников — удовлетворяют тем требованиям, которым не способны отвечать другие формы связи, в том числе оптоволоконные. На момент написания этой книги на орбите Земли находятся более 900 спутников. Однако из-за продолжающегося быстрого развертывания услуг оптоволоконной связи и интернет-протокола (IP) в крупных городских районах Северной Америки, Европы, Азии, Южной Америки и даже в *Африке*, где находятся клиенты, грамотные и изощренные подходы в технологиях и маркетинге, с помощью которых можно органически интегрировать IP в комплексное решение, крайне необходимы спутниковым операторам для поддержания экономического роста.

Прогрессивные спутниковые операторы, несомненно, предпочитают в той или иной степени реализовывать некоторые концепции, представленные в этой книге, концепции, честно говоря, сами по себе не такие уж новые или эзотерические, так как идея создания спутниковых систем имеет гораздо большие перспективы, чем выпуск микроволновых ретрансляторов (микроволновые ретрансляторы с оперативным функциональным эквивалентом ретрансляторов развертывались в 1950-е годы в системе Bell в Соединенных Штатах) для поддержания роста рынка с вертикальной интеграцией крайне востребованных пользователем приложений. Эта идея уже была поддержана наблюдателями от промышленности в конце 1970-х годов (например, но, конечно, не ограничиваясь [MIN197901]) и исследователями технологий тех времен (например, [ROS198201], [ROS198401] и др.).

I.1. Общие сведения

Спутниковая связь основана на системе односторонней или двухсторонней передачи радиочастотных сигналов по *линии прямой видимости* (LOS — line-of-sight), которая состоит из передающей станции, использующей канал восходящей линии связи, находящейся в космосе спутниковой системы, которая действует в качестве узла *восстановления сигнала*, и одной или нескольких приемных

станций, занятых мониторингом канала нисходящей линии связи для приема информации. В случае двухсторонней связи обе конечные станции обладают функциональными возможностями передачи и приема сигналов (рис. 1.1).

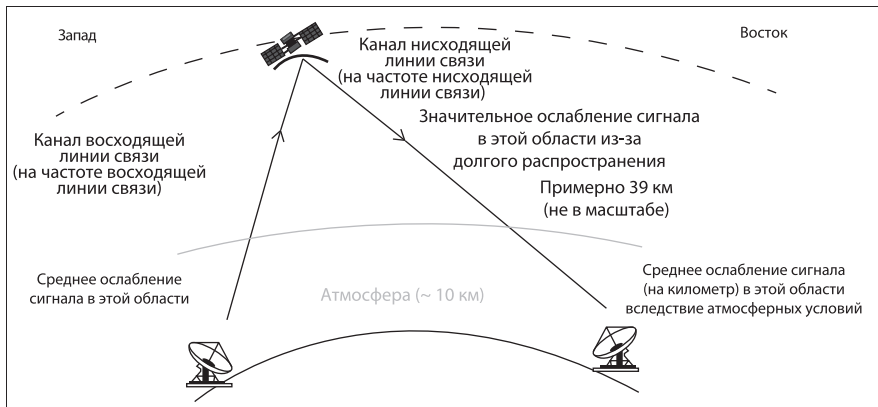


Рис. 1.1. Типичная структура спутниковой связи

Спутники могут находиться на различных околоземных орбитах. *Геостационарная орбита (ГСО)* является концентрической круговой орбитой в плоскости экватора Земли на высоте 35 786 км (22 236 миль) от поверхности Земли (42 164 км от центра Земли, радиус Земли составляет 6378 км). Спутники на геосинхронной орбите (GEO)¹ вращаются на ГСО вокруг Земли с ее угловой скоростью и в том же направлении. Когда спутник находится на этой орбите в плоскости экватора, при наблюдении с земной поверхности создается впечатление, что он остается неподвижным, поэтому не требуется отслеживание этого спутника антенной, направленной на него или (крупной) позиционной корректировки с периодическими интервалами времени².

ГСО представляет собой круговую орбиту, по которой спутник совершает орбитальное движение в том же направлении, что и небесное тело, расположенную в экваториальной плоскости с орбитальным периодом, равным периоду вращения Земли. Возможна работа спутниковой связи на других орбитах: *средней (СОО)* и *низкой (НОО)* околоземных орбитах.

Традиционно спутниковые услуги были официально классифицированы на следующие категории:

- *Фиксированная спутниковая служба связи (ФСС)* (FSS — Fixed Satellite Service) — это спутниковая служба, осуществляющая связь между спутниковыми терминалами, которые располагаются в определенных фиксированных точках, с помощью одного или нескольких спутников. Как правило, ФСС задействована для передачи видео, голоса и данных протокола IP на большие расстояния из фиксированных точек. ФСС использует геостационарные спутники с фиксированными наземными станциями. Сигналы передаются от одной точки на земном шаре как к одной точке (точка-точка),

¹ В этой книге каждый раз при использовании термина «спутник» мы подразумеваем геостационарный спутник связи, если контекст не предполагает иное. Перечень используемых «спутниковых орбит» приведен в табл. 1.1 стр. 36–38

² На практике термины «геосинхронная» и «геостационарная» используются как синонимы.

так и от одного передатчика к нескольким приемникам (точка-многоточечное соединение). FCC может включать в себя связь типа спутник-спутник (мало распространена в коммерческой сфере) или в виде фидерных соединений для других спутниковых услуг, таких как спутниковая служба мобильной связи или спутниковая служба вещания.

- *Спутниковое вещание* (BSS — Broadcast Satellite Service) — спутниковая служба, которая через спутник поддерживает передачу и прием сигналов, предназначенных для непосредственного приема потребителями. Наилучшим примером является услуга прямой трансляции (DBS — Direct Broadcast Service), которая поддерживает прямую трансляцию теле- и аудиоканалов в домах или бизнес-офисах непосредственно со спутников на определенной *полосе частот*. BSS/DBS использует геостационарные спутники. В отличие от FCC, которая имеет связь как точка-точка, так и точка-многоточечное соединение, BSS осуществляет услуги связи только типа точка-многоточечное соединение. Следовательно, для обслуживания этого рынка требуется меньшее количество спутников.
- *Спутниковая услуга мобильной связи* (MSS — Mobile Satellite Service) — спутниковая служба, предназначенная для обеспечения беспроводной связи в любой точке земного шара. Благодаря широкому распространению сотовых телефонов пользователи как само собой разумеющееся стали воспринимать возможность использовать телефон в любой точке мира, в том числе в сельских районах развитых стран. MSS является спутниковой службой, которая расширяет эту возможность. Для приложений телефонии необходим специально сконфигурированный телефон. MSS обычно использует спутниковые системы на COO и НОО.
- *Спутниковая услуга морской мобильной связи* (MMSS — Maritime Mobile Satellite Service) — спутниковая служба, которая осуществляет связь между мобильными наземными станциями спутниковой связи и одним или несколькими спутниками.
- Хотя глобальная система определения местоположения (служба/) система (GPS) формально и не является службой в нормативном смысле, ее можно добавить в этот список; эта служба использует созвездие спутников для обеспечения должным образом оборудованных терминалов информацией о глобальном позиционировании.

За последние несколько лет можно отметить ряд технических и эксплуатационных достижений, которые повлияли на коммерческое приложение спутниковой связи, именно они находятся в центре внимания этой книги. Эффективное использование спектра в настоящее время активно востребовано конечными пользователями, чтобы поддержать экономическую основу распространения контента, а также IP-телефонии (VoIP) и интернет-трафика. В то же время для сохранения роста продаж операторы должны сосредоточиться на предоставлении услуг в области IP (корпоративный и интернет-доступ), видео следующего поколения (гибридное распределение, кэширование, нелинейное видео/видео с манипуляцией временем, высокое разрешение), а также мобильной связи. Некоторые из последних достижений технологий/услуг включают в себя следующее:

- Бизнес-факторы, влияющие на отрасль в момент публикации этой книги, заключаются в стремлении к более высокой общей пропускной способности

спутникового канала и системы. Усовершенствованные схемы модуляции позволяют пользователям увеличить пропускную способность канала: передовые методы модуляции и кодирования (modcod) вводятся в качестве стандартизованных решений, будучи встроенными в модемы нового поколения обеспечивают передачу большего количества битов в секунду на единицу спектра, а адаптивное кодирование позволяет эффективнее использовать более высокочастотные диапазоны, которые по своей природе подвержены ослаблению сигнала вследствие дождевых осадков. В настоящее время внедряются расширения для давно утвержденного стандарта базовой линии DVB-S2.

- Высокая пропускная способность также достигается за счет использования узконаправленных главных лепестков (лучей) диаграммы направленности на *спутниках с высокой пропускной способностью* канала приемо-передачи (HTS — High Throughput Satellites), как правило (но не всегда), работающих в *Ка-диапазоне* (18,3–20,2 ГГц для частот нисходящей линии связи и 28,1–30 ГГц для частот восходящей линии связи), и с помощью сокращения времени ожидания передачи благодаря использованию спутников на СОО. HTS способны поддерживать исходную суммарную пропускную способность на уровне более 100 Гбит/с, таким образом, значительно снижать общие затраты из расчета на бит путем использования ориентированных узконаправленных главных лепестков высокой мощности. Системы и возможности HTS могут быть использованы провайдерами, чтобы расширить портфель предлагаемых услуг спутниковой связи. HTS отличаются от традиционных спутников в разных аспектах, в том числе использованием лучей/ретрансляторов высокой пропускной способности до 100 МГц или более; применением наземных станций-ретрансляторов, которые поддерживают один или два десятка лучей (обычно с требованием к пропускной способности 5 Гб/с); высокой пропускной способностью каждой удаленной станции и передовыми методами решения проблемы ослабления сигнала во время дождя, особенно для систем, работающих в Ка-диапазоне.
- Предоставление услуг связи *людям в дороге*, например, путешествующим на морских и воздушных судах, где отсутствует наземное подключение, в настоящее время является технически осуществимым и финансово выгодным для поставщиков услуг. Когда эта услуга требуется на скоростных самолетах, нужно принять во внимание конструктивные соображения относительно специальных антенн (например, следящих антенн).
- Подключение M2M (машина-машина) для грузовых автомобилей во время трансконтинентальных рейсов, сбор телеметрической информации самолетов в режиме реального времени или отслеживание данных о передвижении торговых судов открывает новые возможности для расширения интернета вещей (IoT) для широко распределенных объектов, в частности, в океанических средах. С увеличением мировой торговли некоторые наблюдатели связывают возрастающие требования к морским сетям связи, поддерживаемым спутниковой связью. Требования к морской связи могут варьироваться в зависимости от типа судна, компании-оператора, объема данных, потребностей экипажа и пассажиров и используемых приложений (в том числе Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения без-

опасности (ГМССБ, GMDSS — Global Maritime Distress and Safety System), поэтому может быть востребован или применен целый ряд решений.

- Новое *телевидение ультравысокой четкости* (UHDTV — Ultra High Definition Television) (также известное как *Ultra HD* или UHD) обеспечивает качество видео, которое эквивалентно 8–16 экранам HDTV. Понятно, что это требует гораздо более высокой пропускной способности для каждого канала, чем используется при передаче видео в настоящее время. Появляются так называемые 4K и 8K версии на основе разрешающей способности видео по вертикали. Спутниковые операторы планируют позиционировать себя в этом сегменте рынка с позиции предоставления общедоступных вещательных услуг, запланированных до 2020 года, и более целенаправленных передач, трансляция которых началась во время написания этой книги. UHDTV потребует пропускную способность около 60 Мбит/с для услуг по распространению сигнала и 100 Мбит/с для способствующих услуг. Использование расширений DVB-S2 (и, возможно, ретрансляторов с более широкой полосой пропускания, например, на 72 МГц) будет общим требованием. Новый стандарт сжатия видео (алгоритм) *H.265/HEVC* (High Efficiency Video Coding — высокоэффективное кодирование видеоизображений) обеспечивает в 2 раза большую эффективность сжатия по сравнению с базовым алгоритмом *H.264/AVC* (Advanced Video Coding — усовершенствованное кодирование видеоизображений). Тем не менее он также повышает сложность вычислений, требующих более современных наборов микросхем. В последние годы было разработано много методов демонстраций и моделирования, особенно в 2013 году, выпуск продуктов коммерческого класса ожидается в период 2014–2015 гг., как раз вовремя для использования в приложениях для UHD (наземных и спутниковых). Даже в контексте видео стандартной (SD)/высокой (HD) четкости обновление кодирующего оборудования для наземных станций поставщиками контента для *H.264 HEVC* снижает требования к пропускной способности (и, следовательно, повторяющиеся расходы) до 50%. Обновление с DVB-S2 до расширений DVB-S2 (DVB-S2X) может уменьшить пропускную способность дополнительно на 10–60%.
- Гибридные сети, объединяющие спутниковые и наземные подключения (особенно IP-сети), будут играть важную роль в ближайшем будущем. Широкое внедрение IP-услуг, в том числе IP-телевидения (IPTV) и видео в интернете (OTT video — over-the-top video), что обусловлено продолжающимся развертыванием оптоволоконной связи, в конечном счете, изменит индустрию. В частности, IP-протокол версии 6 (IPv6) представляет собой технологию, которая в настоящее время развернута в различных частях мира и позволяет производить прямую адресацию между конечными устройствами. Интеграция спутниковой связи и возможностей IPv6 обещает обеспечить основу создания сетей гибридной инфраструктуры, которая может обслуживать растущие потребности в правительстве, среди военных, IPTV и агентов мобильного видео, и это далеко не все заинтересованные лица.
- На уровне базовой технологии изучаются и, по сути, разрабатываются электрические (вместо химических) двигатели для космических аппаратов; такие подходы к конструкции двигателей могут уменьшить вес космических аппаратов (и также стоимость запуска) и, возможно, продлить срок служ-

бы космического аппарата. Согласно мнению сторонников этой концепции, использование электрического ракетного двигателя (ЭРД) для удержания спутника в заданной точке орбиты уже изменило глобальную спутниковую индустрию и теперь благодаря дозаправке топливом на орбите и увеличению высоты орбиты готово ее трансформировать.

- Кроме того, на рынок выходят новые *пусковые платформы*, опять же с целью снижения стоимости запуска за счет увеличения конкуренции.

Таким образом, очевидно, что спутниковая связь играет и будет продолжать играть ключевую роль в коммерческих, TV/СМИ, правительственных и военных коммуникациях из-за своих собственных возможностей многоадресной /широковещательной передачи, аспектов мобильной связи, глобального охвата, надежности и способности быстро поддерживать связь в открытом пространстве и/или агрессивных средах. В этой книге рассматриваются некоторые из этих новых ключевых достижений и те последствия и/или возможности для конечных пользователей и поставщиков услуг, которые они могут повлечь за собой. Книга представляет собой законченный труд, следовательно, некоторые основные технические сведения были включены в эту вводную главу.

1.2. Проблемы и возможности отрасли: развивающиеся тенденции

1.2.1. Проблемы и возможности

Расширяя рамки наблюдений, сделанных во вступительном разделе, полезно оценить некоторые общие тенденции в отрасли по состоянию на середину десятилетия — 2010-е годы. Наблюдения, подобные приведенным ниже, частично характеризуют окружающую среду и тенденции:

«...Изменение экономики отрасли [является] ключевым фактором долгосрочного роста спутникового сектора... Мы должны приблизиться к реальности, стать более эффективными, раздвинуть границы... отрасль должна не только снизить затраты, но и расширить рынок за счет инноваций...»

[WAI201401];

«...Спутниковый рынок переживает кардинальные изменения во всех аспектах — от запуска новых спутников с высокой пропускной способностью до резкого снижения стоимости запуска, обусловленного смелостью новых участников рынка... недорогие и надежные варианты запуска [становятся все более доступными]...»

[WAI201401];

«...Это открытый вопрос для того, кто заметил самые высокие темпы роста. Будет ли первая четверка продолжать выигрывать крупные сделки и подталкивать отрасль к дальнейшей консолидации или маятник качнется к региональным игрокам с их более тесными связями с внутренними/национальными клиентскими базами и запуском новых спутников под «национальным флагом»?...»

[GLO301301];

«... Совмещение беспроводных характеристик, телефонии и услуг высокоскоростного широкополосного интернета по мере снижения конкуренции; пул клиентов платного телевидения достигает максимума в США [и в Европе], потому что зрители все чаще смотрят видео через интернет...»

[SHE201401];

«... Рынок ТВ и видео переживает существенный сдвиг в способе получения и потребления контента, который уже не повернуть назад. Технические инновации и пакетизация новых услуг умножают... взаимодействия между контентом и зрителями... Четыре основные движущие силы влияют на способ управления контентом от его производства до распространения и монетизации. Ими являются:

- делинеаризация потребления контента и умножение экранов и сетей для доступа к контенту;
- более быстрый рост конкуренции, чем в общем объеме продаж; новые источники контента, посредники и дистрибьюторы конкурируют за цепочку создания стоимости;
- более короткие циклы инноваций и инвестиций, чтобы удовлетворить ожидания клиентов; а также
- быстрый рост в развивающихся регионах открывает новые возможности для расширения бизнеса за счет возрастающей адаптации к местным потребностям...»

[BUC201401].

«... Поиск инновационных конфигураций спутников и их запуска является абсолютной необходимостью для спутниковой индустрии, если она собирается оставаться конкурентоспособной в отношении наземных технологий... стоимость спутника плюс стоимость ракеты-носителя для... доставки 36-мегагерцного ретранслятора на орбиту составляет 1,75 млн долларов...»

[SEL201402];

«... Множество факторов способны нарушить рынок и оказать влияние на конкуренцию, спрос или цены... разукomплектование фиксированной спутниковой службы связи (FSS — fixed satellite system) мобильной спутниковой системы (MSS — Mobile Satellite Systems), появление новых конкурентов на арене наблюдений за поверхностью Земли, изменения в поведении правительства США как клиента, растущая конкуренция со стороны развивающихся рынков, рост правительства (глобально) в качестве источника финансирования спутникового сектора рынка и принятия стандарта 4K для DBS...»

[SAT201401];

«Термины «инновация» и «изготовление спутников» не всегда стоит употреблять в одном и том же предложении... Из-за дороговизны и неприятия риска технических сложностей инновации довольно медленно совершаются в области спутниковой связи...»

[PAT201301];

«... После совершения прямых высокоприбыльных инвестиций новые инициативы роста выглядят имеющими либо более высокие риски, либо более низкий доход... Является ли сама зрелость отрасли разрушительным фактором, форсируя проведение экспериментов, которые выходят за границы риска?...»

[SAT201401];

«Для поддержания обмена большими и все увеличивающимися объемами передачи данных, видео и голоса через спутник требуются все более высокие скорости передачи, более эффективные технологии спутниковой связи и более широкополосные ретрансляторы. Кроме того, конечные пользователи ожидают получить возможность соединения в любом месте в любое время — там, где они путешествуют, живут или работают. Самый большой спрос на расширения стандарта DVB-S2 наблюдается для видео и высокоскоростных IP-услуг, так как эти услуги наиболее подвержены влиянию роста скоростей передачи данных...»

[WIL201401];

«Последние данные подтверждают, что рынок спутников широкополосной связи или так называемых спутниковых систем высокой пропускной способности находится на подъеме. Поскольку общий кумулятивный объем капитальных вложений в спутники с высокой пропускной способностью повышается до 12 млрд долларов, должен быть поднят важный вопрос: каким образом эти новые системы будут влиять на умонастроения в нашей отрасли?... Большой приток этой мощности на рынок создает некоторые опасения по поводу риска избыточного предложения в таких регионах, как Латинская Америка, Ближний Восток и Африка и Азиатско-Тихоокеанский регион...»

[DER201301];

«... [Спутник с высокой пропускной способностью] предназначен для преобразования экономики и качества услуг широкополосной спутниковой связи... в течение следующего десятилетия служба спутникового сканирования ускорит рост спроса на мультимедийный доступ в интернет... Современные спутниковые системы не предназначены для приложений, требующих высокой пропускной способности, которые востребованы населением, таких как видео, обмен фотографиями, VoIP и соединения одноранговых сетей. Решение состоит в том, чтобы увеличить пропускную способность и скорость передачи данных с использованием спутниковой связи. Улучшение службы спутниковой связи заключается не только в более высоких скоростях, но в увеличении ширины полосы пропускания, доступной для каждого клиента в сети, что позволит уменьшить сетевые конфликты...»

[VIA201401];

«Приобретение коммерческих ГСО-спутников связи будет оставаться на стабильном уровне в течение ближайших 10 лет. В то время как промышленность будет испытывать краткосрочный спад после высоких показателей 2013 г.... Движущими факторами по-прежнему будут замена устаревших и ввод некоторых расширений, в первую очередь в Ки-диапазоне и HTS. Тем не менее ряд тенденций будет влиять на кривую их роста и существенно изменять компромиссные условия для производства спутников:

- Рост использования новых типов двигателей;
- Предложения других платформ от растущего числа поставщиков;
- Рост применения многолучевых архитектур;
- Услуги запуска будут расширяться в сторону большей массовости.

Формирование всей индустрии направлено в рост, в том числе и производителей спутниковых систем, и поставщиков услуг запуска... В последние несколько лет доли рынка значительно увеличились, и после нескольких лет самоуспокоенности некоторые игроки оказались на грани полной незначительности в этом важном пространстве рынка...»

«...Мы живем в интеллектуальном, взаимосвязанном мире. Количество устройств, подключенных к интернету, в настоящее время превышает общее число людей на планете, и к концу десятилетия мы уже разогнались до 50 миллиардов устройств... последствия этого нового «интернета вещей (IoT)» огромны. Согласно данным недавнего доклада McKinsey Global Institute, IoT имеет потенциал для реализации к 2025 году новой экономической ценности на 6,2 трлн долларов в год. Фирма также прогнозирует, что к тому времени от 80 до 100% от всех производителей будут использовать приложения IoT, что только для мировой обрабатывающей промышленности означает потенциальные экономические последствия на уровне 2,3 трлн долларов...»

[NEP201401];

«... В докладе содержатся следующие основные выводы:

- Годовой доход беспроводного рынка M2M будет составлять около 196 млрд долларов к концу 2020 года, следуя совокупным темпам годового роста (CAGR Compound Annual Growth Rate) на уровне 21% в течение шестилетнего периода между 2014 и 2020 годами;
- Установленная база M2M-соединений (проводных и беспроводных) будет расти в среднем на 25% в период между 2014 и 2020 годами, в конечном счете достигнув около 9 млрд соединений по всему миру;
- Растущее число беспроводных решений M2M в чувствительной критической инфраструктуре отрасли оказывает глубокое влияние на решения для безопасности сети M2M, рынок по оценкам достигнет почти 1,5 млрд долларов ежегодных расходов на конец 2020 года;
- Ведомые требованиями к управлению устройствами, результатами анализа данных облачных вычислений и диагностических средств, ежегодные расходы на конец 2020 года на платформы M2M/IoT (включая платформы устройств, подключенных к интернету [CDP — Connected Device Platform], платформы для реализации приложений [AEP — Application Enablement Platform] и платформы разработки

приложений [ADP — Application Development Platforms), как ожидается, составят 11 млрд долларов...»

[SST201401].

Кевин Эштон известен как автор термина «интернет вещей» — системы, в которой интернет подключен к физическому миру с помощью повсеместно установленных датчиков [MIN201301]. В последнее время он сделал весьма убедительные замечания, которые, учитывая их глубину, приведены здесь (почти) в полном объеме:

«Вчера воздушный поиск плавающих обломков малазийского боинга рейса 370 был отменен, а подводный поиск, который проводили на основе вероятных сигналов приводного радиомаяка, был завершен без успеха... Более чем 50-дневная работа, которую австралийский премьер-министр Тони Эбботт назвал «пожалуй, самым трудным поиском в истории человечества», только подчеркивает большой технологический разрыв. Мы живем в эпоху, которую я когда-то назвал «интернет вещей», где все — от автомобилей до весов в ванной и медленноварки (Crock-Pots) — можно подключить к интернету, но так или иначе, самолетные системы передачи данных оказались не подключены ни к чему... система адресации и отчетности по воздушным сообщениям (ACARS — Aircraft Communications Addressing and Reporting System), которая была изобретена в 1970-е годы и основана на телексе, почти вековым предке текстовых сообщений, производилась в существенной степени устаревшими факсимильными аппаратами... Когда так много всего подключено к интернету, то почему аэрокосмическая промышленность для поиска флэши-накопителей в море использует технологию, которая предшесвует факс-аппарату? Потому что в то время как технологии для наземной связи быстро совершенствовались в течение последних 40 лет, технологии для воздушной связи застряли в 1970-х годах. Проблема начинается не с самолетов, а со спутников, которые позволяют отслеживать их. Спутник Sentinel-1A, например, весит две с половиной тонны, стоит около 400 млн долларов и был запущен на ракете, разработанной в Советской России в 1960-е годы. Sentinel может хранить такой же объем данных, как семь айфонов. Когда эта реликвия из эры мейнфреймов (модулей) была отправлена на орбиту? 3 апреля. Огромные дорогие спутники с малой вычислительной мощностью, запускаемые с помощью ракет, имеют смысл для широкого вещания, где один спутник посылает один сигнал множеству целей (например, телевизионным приемником), но они, как правило, слишком дороги и недостаточно «умны», чтобы быть частью интернета, где много целей (например, самолетов) могут послать много сигналов на один спутник. Именно поэтому большинство спутников ретранслируют телевизионные сигналы, делают снимки Земли или посылают сигналы, которые управляют системами GPS. Это также является причиной того, что невозможно проследить траекторию полета самолетов и определить их местоположение, кроме как по инверсионному следу: сигналы сотовых телефонов и Wi-Fi не достигают

земли с высоты 10 км, поэтому самолеты должны иметь возможность передавать информацию на спутники, которые также экономически не в состоянии обрабатывать данные сети, но предназначены для ретрансляции сигнала на приемные антенны в форме тарелок, которые было невозможно модернизировать для самолетов.

Решение этих проблем просто: нам нужны новые спутниковые технологии. И они на подходе. Богатые частные инвесторы и блестящие молодые инженеры переносят спутники в XXI век благодаря изобретениям, которые включают «пучки» из «наноспутников», которые весят всего лишь 1,5 кг; плоские, тонкие антенны, построенные на основе использования передовых материалов, называемых «метаматериалами»; «формирование луча», которое управляет радиосигналами с помощью программного обеспечения. 9 января 2014 года участники стартапа из Сан-Франциско под названием Planet Labs послали группировку из 28 наноспутников в космос. Первое приложение для этого типа технологии — это съемка Земли, но она также может быть использована для получения потоковой передачи данных с самолета, модернизированного этими новыми, плоскими «метаматериальными» антеннами. Есть много других перспективных систем. Появляются десятки новых спутниковых технологий и бесчисленное множество способов их комбинации. Получение потоковых данных самолетов уже скоро станет дешевой и простой операцией».

[ASH201401].

1.2.2. Тенденции развития технологий

Спутниковая¹ отрасль включает в себя производителей космических аппаратов, ракет, спутниковых операторов и разработчиков системного оборудования. Главными операторами являются Eutelsat, Intelsat, SES и TELESAT; также существуют свои национальные провайдеры (в частности, у стран-членов БРИКС: Бразилия, Россия, Индия, Китай и ЮАР). В 2013 году рост совокупного дохода отрасли был на уровне примерно 3–4%; формирующийся рынок и разрабатываемые приложения будут движущей силой продолжения и/или улучшения роста: наблюдатели утверждают, что 80% будущего роста спроса на спутниковые услуги придется на южное полушарие, хотя «качество» доходов в этих районах не сравнить с развитыми странами. Как правило, операторы по всему миру запускают около двух дюжин коммерческих спутников связи в год.

Как указывалось выше, мобильная связь для коммерческих пользователей представляет большие возможности для развития бизнеса спутниковых операторов. Некоторые обозреватели видят практическое сближение того, что когда-то было официальными MSS и FSS. Многие из развивающихся услуг мобильной связи основаны на использовании спутников, поддерживающих главным образом

¹ Услуги, варианты обслуживания и поставщики услуг изменяются с течением времени (добавляются новые, а существующие могут исчезать со временем); как таковые любые услуги, опции обслуживания или поставщики услуг, упомянутые в этой главе, указаны исключительно как иллюстративные примеры возможных новых технологий, тенденций и подходов. Таким образом, упоминание призвано обеспечить педагогическую ценность. В свою очередь явное или неявное упоминание какого-либо поставщика или продукта (или его отсутствие) не предполагает каких-либо рекомендаций или противного.

(или частично) FSS. Многие авиакомпании планируют модернизировать свои самолеты, чтобы предложить услуги подключения в полете. В качестве иллюстративного примера можно привести опыт компании *El Al Israel Airlines*, которая в 2014 году объявила, что с 2015 года начнет оснащать оборудованием свой парк воздушных судов Боинг-737, чтобы обеспечить в полете широкополосную спутниковую связь с использованием услуги *Exede in the Air*, принадлежащей компании *Viasat*, при поддержке со стороны спутников KA-SAT, работающих в *Ka-band* и принадлежащих компании *Eutelsat*. (Спутниковая связь с использованием космических аппаратов KA-SAT, принадлежащих компании *Eutelsat*, покрывает почти всю Европу, Ближний Восток, часть России, Средней Азии и Восточной Атлантики.) Пассажирам будет предложено несколько вариантов интернет-услуг, в том числе один бесплатный сервис для подключения ноутбуков, планшетов или смартфонов к интернету; *Exede in the Air*, как сообщается, способна доставлять до 12 Мбит/с на каждого пассажира, скорость, по словам представителей компании, не зависит от числа пользователей на данном самолете [SEL201403]. Для того, чтобы обеспечить полный полетный интернет-сервис для самолетов, авиакомпании необходимо добавить бортовые терминалы, следящие антенны и обтекатели бортовых антенн на борт воздушного судна, а также подписаться на полосу пропускания спутникового канала (во время полета) выбранных спутников.

Появляются новые архитектуры, связанные с конструкцией спутников. Действительно, до недавнего времени спутниковые операторы проявляли сдержанный интерес к полностью электрической силовой установке спутника, главным образом потому, что космическому аппарату с этим типом силовых установок требуются месяцы, а не недели, для достижения конечной рабочей позиции на ГСО. Спутниковые операторы сообщили, что они также озабочены большой продолжительностью перемещения своих спутников, уже находящихся на геостационарной орбите, из одной орбитальной позиции в другую, что приходится не раз совершать в течение всего жизненного цикла спутника, который может составлять 15–20 лет (такие перемещения очень распространены, поскольку позволяют оператору удовлетворять потребности в полосе пропускания в различных частях мира по мере их возникновения — в некоторых случаях до 25% спутникового парка оператора может находиться в состоянии перемещения) [SEL201402]. Тем не менее есть якобы определенные экономические преимущества использования электронно-силовой установки космических аппаратов, которые могут снизить затраты на создание средств ретрансляции с широкой полосой пропускания спутниковых ретрансляторов, тем самым открывая путь новым рынкам и приложениям. Некоторые ключевые операторы недавно заявили о возвращении интереса к этой технологии. Большой, сложный космический аппарат может весить более 6000 кг, снижение веса позволит значительно снизить затраты на запуск, электрическая силовая установка способна привести к созданию космических аппаратов, которые весят около 50% того, что он будет весить на старте с полноценным химическим двигателем. Некоторые наблюдатели отрасли ожидают увидеть появление гибридного решения, которое экономит часть массы ракеты и спутника благодаря электрической тяге, но при этом сохраняет обычное химическое топливо, чтобы ускорить прибытие спутника в конечную рабочую позицию.

На уровне конечного пользователя был сделан целый ряд технологических разработок, в том числе расширения для DVB-S2, модемы с более жесткими

спадами характеристик фильтров, адаптивная предварительная коррекция для борьбы с нелинейностью передающего оборудования и групповой задержкой. Эти разработки для модемов увеличивают пропускную способность, которую можно достичь в канале (расширяя сферу приложения) или уменьшить аналоговый спектр, необходимый для поддержания определенной скорости передачи данных (таким образом снижая стоимость приложения).

Область возможных новых деловых и технических возможностей влечет за собой концепцию «*бортовой полезной нагрузки*». НАСА и Министерство обороны США (DoD — US Department of Defense) начали поиск в коммерческом космическом секторе более экономически эффективных решений по сравнению с проприетарными подходами, в том числе с использованием попутных полезных нагрузок. В конструкцию космического аппарата, построенного для коммерческих услуг, заложена возможность дополнительной грузоподъемности по массе, объему и мощности. Эта способность может быть использована для размещения дополнительной (правительственной) полезной нагрузки, такой как транспондеры связи, камеры наблюдения Земли или техника для демонстрационных испытаний. Такие «попутные полезные нагрузки» могут предоставлять государственные органы с возможностью получения доли от стоимости выделенного спутника, а также спутниковые операторы в качестве дополнительного источника дохода [FOU201201]. Ряд геосинхронных спутников связи, запущенных в последние годы, принимали на борт полезную нагрузку, и сейчас наблюдаются все признаки того, что попутные полезные нагрузки приобретают все более широкое признание, поскольку государственные органы все чаще ограничены в своих возможностях из-за сокращения финансирования. Недавно Центр ракетно-космических систем Космического командования ВВС США (SMC — Space and Missiles Systems Center) сформировал Бюро попутных полезных нагрузок (Hosted Payload Office), чтобы лучше координировать возможности их размещения, когда они приходят по линии правительственных учреждений. ВВС ранее запустили *Commercially Hosted InfraRed Payload (CHIRP)* в качестве попутной полезной нагрузки на спутнике связи, чтобы проверить возможности использования нового инфракрасного датчика для систем предупреждения о ракетном нападении в будущем. ВВС, как сообщается, планирует на основе успеха CHIRP разработать последующую программу под названием CHIRP + опять-таки с использованием полезных нагрузок, размещенных для тестирования инфракрасных датчиков. В другом примере ВС Австралии разместили попутную полезную нагрузку на коммерческом спутнике *Intelsat 22*, чтобы обеспечить ДМВ связь для вооруженных сил. Сообщается, что правительство сэкономило более 150 млн долларов по сравнению с альтернативными подходами, поэтому размещение попутной полезной нагрузки было на 50% более эффективно экономически, чем запуск отдельного спутника только как носителя полезной нагрузки, кроме того, это было на 180% эффективнее, чем лизинг объема спутника. Некоторыми другими примерами попутных приложений являются EMC-Arabsat и GeoMetWatch-Asiasat. Преимущества попутных полезных нагрузок значительны, хотя могут быть институциональные проблемы для спутниковых операторов и потенциальных правительственных клиентов при проработке вопросов закупок и интеграции.

Существует новая категория развивающихся космических технологий, которые называются космической логистикой. Услуги включают в себя продление

срока службы, использование межорбитальных транспортных тягачей, выравнивание позиций космических аппаратов, размещение попутных полезных нагрузок и, возможно, перемещение топлива. ViviSat является примером компании, которая стремится обеспечить обслуживание на орбите для спутников на ГСО.

В последнее время спутниковые технологии и услуги M2M привлекают повышенное внимание. Как уже упоминалось в предыдущем разделе, существует настоятельная необходимость, например, в модернизации глобального авиационного флота для поддержки разнопланового, надежного, бесперебойного отслеживания функций, состояния и местоположения воздушного судна. Можно было бы ожидать, что такие основные функции безопасности будут положительно приняты в будущем глобальными авиационными регулирующими органами (например, Международной организацией гражданской авиации (ICAO — International Civil Aviation Organization)). *Спутниковая антенна M2M* и модем стоят около 125 долларов. В то время как наземная приемная система сотовой связи, как правило, стоит всего 50 долларов, но она не имеет полного охвата спутниками, особенно в глобальном масштабе. Ведется работа по сокращению стоимости спутниковой системы пользователя до 90 долларов. Провайдерами являются *Inmarsat*, *Iridium*, *Orbcomm* и *Globalstar*. Текущая доля спутников на мировом рынке M2M оценивается в 5% (каждый процентный пункт представляет около 100 000 установленных блоков); в этом сегменте в ближайшее время ожидается рост. Например, провайдер спутниковой M2M службы обмена сообщениями *Orbcomm* запустил спутниковую группировку второго поколения из 17 космических аппаратов на двух ракетах *Falcon 9*, управляемых *Space Exploration Technologies Corporation* (Корпорация использования технологий в исследованиях космоса) в 2014 году. Спутники нового поколения будут обратимо совместимы с существующими модемами и антеннами *Orbcomm*, используемыми для отслеживания состояния стационарных и мобильных активов, но новые спутники имеют в 6 раз больше приемников на борту, чем существующие космические аппараты, и предлагают в 2 раза более высокую скорость доставки сообщений (созвездие спутников второго поколения будет примерно в 100 раз превосходить общий потенциал существующих спутников) [SEL201404]. Спутник M2M расширяет связь, доступную наземным сотовым сетям, не только внутри страны, но на суше и на море.

Малые спутники специального назначения (так называемые *smallsats*, а также микроспутники или *наноспутники*) в настоящее время оцениваются некоторыми операторами как вариант развития отрасли. Эти спутники весят в пределах 1–10 кг. Применение малых спутников обеспечивает гибкость миссии, снижает затраты и риск, сокращает время выхода на орбиту, а также эксплуатационные и технические сложности. Эти спутники могут быть использованы для географических информационных систем, космической науки, спутниковой связи, получения спутниковых снимков, данных дистанционного зондирования, научных исследований и разведки. Далее в рамках этого континуума можно обнаружить, что существуют пикоспутники (например, спутники *Cubesat*), которые могут выполнять различные научные исследования в космосе. Прогресс во всех областях разработки технологий малых спутников позволит им функционировать в составе созвездий и производить совместные измерения. Группировки спутников позволяют решать совершенно новые классы задач для навигации, связи, ди-

станционного зондирования и научных исследований в гражданских и военных целях. Объем и доступность таких разноплановых космических миссий тесно связаны с возможностями, технологичностью и технической готовностью их компонентов, а также разнообразными возможностями запуска, которые доступны на сегодняшний день [SMA201301]. Наблюдения Земли и дистанционное зондирование, как ожидается, составят самую большую долю рынка к 2019 году; также рассматривается их использование в коммерческих приложениях связи.

В 2014 году *Google* объявил о планах по размещению 180 малых низкоорбитальных спутников для обеспечения доступа к интернету в тех регионах земного шара, где подобного обслуживания явно недостаточно. *Google* ранее инвестировал в инициативу *O3b Networks*, но, видимо, искал другой механизм входа в спутниковое пространство. Для завершения проекта может потребоваться несколько миллиардов долларов. *Google* ведет поиск путей обеспечения доступа в интернет в развивающихся регионах, не вкладывая деньги в дорогие наземные инфраструктуры; например, его сотрудники представили *Project Loon*, который предполагает поставки интернета через воздушные шары на солнечных батареях с дистанционным управлением. На момент публикации этой книги подробная информация о проекте вообще не была доступна, но обсуждаемые в нем спутники могут принадлежать к типу малых спутников или быть еще более совершенными.

Также совершенствуются конструкции антенн. Например, *Panasonics* использует фазированную антенную решетку для подключения к интернету во время полета. В качестве другого примера можно сказать, что в целом, в некоторых системах *COO-HTS* требуется две антенны слежения; тем не менее, некоторые производители (например, *Kymeta*) разрабатывают антенну с плоской панелью из метаматериалов, которая способна отслеживать и мгновенно переключать соединения между спутниками. По состоянию на данный момент *Kymeta* продемонстрировала способность принимать сигналы, а в следующих планах — демонстрация способности передачи. Эта антенна в настоящее время работает в *Ka-диапазоне*, но поставщик, как сообщается, планирует разработку версии, работающей в *Ku-диапазоне*.

Некоторые разработчики положительно оценивают возможности проекта, который называется «когнитивные системы спутниковой связи» (также известный как *CoRaSat* [когнитивное радио для спутниковой связи]). Эти системы планируется наделить возможностью автоматически обнаруживать и реагировать на ухудшение канала передачи, такие как (но не ограничиваясь) *помехи от соседнего спутника* (*ASI* — *Adjacent Satellite Interference*), *соседнего канала* (*ACI* — *Adjacent Channel Interference*), ослабление сигнала во время дождя и вариации в работе граничной частоты, вызванные рядом причин. Эти достижения основываются на более общей концепции «когнитивного радио», в которой динамическое управление использованием спектра применяется для борьбы с дефицитом общего передающего спектра. Поскольку выделенный спутниковый спектр становится дефицитным в различных частях мира из-за растущего спроса на вещание, мультимедиа, услуги наземной мобильной связи, а также интерактивные интернет-услуги, применение эффективных методов совместного использования спектра для повышения эффективности его использования в области спутниковой связи позднее стало важной темой. Когнитивные методы, такие как *спектральное зондирование* (*SS* — *Spectrum Sensing*), моделирование помех, диаграммообра-

зование, коррекция помех и когнитивное формирование луча сейчас проходят оценку с целью возможной реализации в ближайшем будущем.

Спутниковая ретрансляция для региональных услуг 2G, 2,5G, 3G и 4G/LTE в слаборазвитых районах (например, в Африке и Южной Америке) является новым и развивающимся приложением. Спутники также используются в качестве первичных звеньев основных магистралей *операторов мобильной связи* (MNO — Mobile Network Operators) и для услуг восстановления нормального режима работы системы, где в качестве основных видов связи используются оптоволоконная и кабельная. Цель состоит в том, чтобы позволить мобильной связи MNO достичь большего количества пользователей, одновременно снизив общую стоимость предоставляемых услуг. Добавление кэширования с использованием вышек ретрансляции от спутникового распределения телевизионных программ также может поддерживать некоторые услуги передачи видео-по-запросу на смартфоны в этих регионах мира.

Другой важной областью для операторов является доступность спектра; это относится к разрешениям для передачи в определенных полосах частот с конкретных орбитальных позиций, а также «права на землю» (landing rights), которое представляет собой положения, касающиеся разрешения на использование сигналов иностранных спутниковых служб в указанных странах. Ключевой областью обсуждения на *Всемирной конференции радиосвязи 2015 года* (WRC, World Radiocommunication Conference (WRC)) являлись усилия операторов беспроводной наземной связи в попытке получения спектра С-диапазона для разрабатываемых приложений 4G/5G. Исследования показали, что услуги международной мобильной связи (IMT — International Mobile Telecommunications) мешают работе спутников фиксированной спутниковой службы, на долю которой приходится 38% всех спутников (не считая HTS) [WAI201401, SEL201401].

Спутниковые сети не могут больше продолжать свое существование как автономные острова во Всемирной паутине (для которой требуется) любое подключение устройства в любое время/в любом месте/любого контента. Отсюда следует, что гибридные сети обретают важную роль. Широкое внедрение IP-услуг, в том числе на основе распределения контента на базе IP-протоколов, в течение следующих 10 лет будет обязательно направлять значительные изменения в отрасли. Интеграция спутниковой связи и возможностей IP-протоколов (в частности, IPv6) обещает создание более симбиотической сетевой инфраструктуры, которая может лучше обслуживать растущие потребности пассажиров, бизнес-предприятия, правительство и военных, а также участников рынка IPTV/OTT/сети распределения контента (CDN — Content Delivery Network). Операторы должны стать гораздо более информированными относительно возможностей IP-протоколов, чтобы оставаться на рынке.

Консолидация отрасли продолжается и на уровне бизнеса. Два основных слияния, произошедших в последнее время, включают в себя покупку AT&T компании DirectTV *DirectTV* и приобретение Comcast компании Time Warner Cable. Из заявления при покупке следует, что приобретающие компании пытались с опережением адаптироваться к ключевым тенденциям бизнеса: рост цен на контент, потребность в масштабе, растущее значение широкополосной связи, а также все более широкое использование видео на мобильных платформах — все это было движущей силой этих сделок. В то время как AT&T была сосредоточена на

интернет-услугах, которые рассматривались как «будущее [заключается] в передаче видео в должном масштабе», в том числе спутниковое видео и интернет, всеохватывающее ОТТ-видео и мобильность [FAB201401]. Цели этих слияний связаны с «синергией»: больше эффективности в предоставлении услуг по более низкой внутренней себестоимости. В Соединенных Штатах покупка Comcast компании Time Warner Cable и AT&T — компании DirectTV рассматриваются как «переформатирование видео ландшафта, которое, по-видимому, направит обе компании в сторону большей конкуренции». Другие игроки на рынке нуждаются в снижении затрат на реинжиниринг ряда функций, в том числе некоммерческое производство наземных активов, которое зачастую страдает чрезмерно избыточной функциональностью и выходит далеко за рамки того, что необходимо для поддержания непрерывности бизнеса. Ожидается, что подобные тенденции будут влиять на других операторов спутниковых связи/видео по всему миру в течение следующих нескольких лет.

С точки зрения регулирования, 13 мая 2014 года Государственный департамент США и Министерство торговли США опубликовали окончательные правила передачи определенных спутников и компонентов из американского Списка импортного военного имущества (USMIL — US Munitions Import List) в Перечень товаров и услуг, подлежащих экспортному контролю (CCL — Commerce Control List). Эти правила являются результатом совместной работы Администрации и Конгресса с привлечением консультантов от промышленников для реформирования правил, регулирующих экспорт спутников и связанных с ними элементов. Эти изменения позволят более адекватно калибровать средства управления в целях повышения конкурентоспособности американской промышленности, обеспечивая при этом постоянную защиту ключевых технологий для сохранения национальной безопасности. Изменения в правилах контроля за распространением радиационно стойких микроэлектронных микросхем вступают в силу через 45 дней после их опубликования, в то время как остальная часть изменений вступит в силу через 180 дней после опубликования. Ранее в этом году Министерство юстиции опубликовало окончательное постановление, которое вносит изменения в USMIL в рамках президентской инициативы по реформированию экспортного контроля (ECR — Export Control Reform). В ходе этих изменений будут удалены касающиеся обороны статьи, которые были в USMIL, тем самым больше не поддерживается контроль импорта в соответствии с Законом о контроле над экспортом вооружений (Arms Export Control Act), что позволяет правоохранительным органам сосредоточить свои усилия там, где они больше всего нужны. Эта важная реформа модернизирует USMIL и будет способствовать большей национальной безопасности [ECR201401].

На рис. 1.2 показана основная хронология некоторых ключевых достижений, оказавших большое влияние на индустрию.

Достижения и инновации в области спутниковой связи и разработки спутников не ограничиваются тем, что было перечислено ранее, хотя они являются более заметными инициативами на данном этапе. Темы, обсуждаемые в этих вводных разделах, посвященных представлению общих сведений и тенденций, будут оцениваться более подробно в последующих главах. Остальная часть этой главы представляет учебный материал по спутниковой связи.

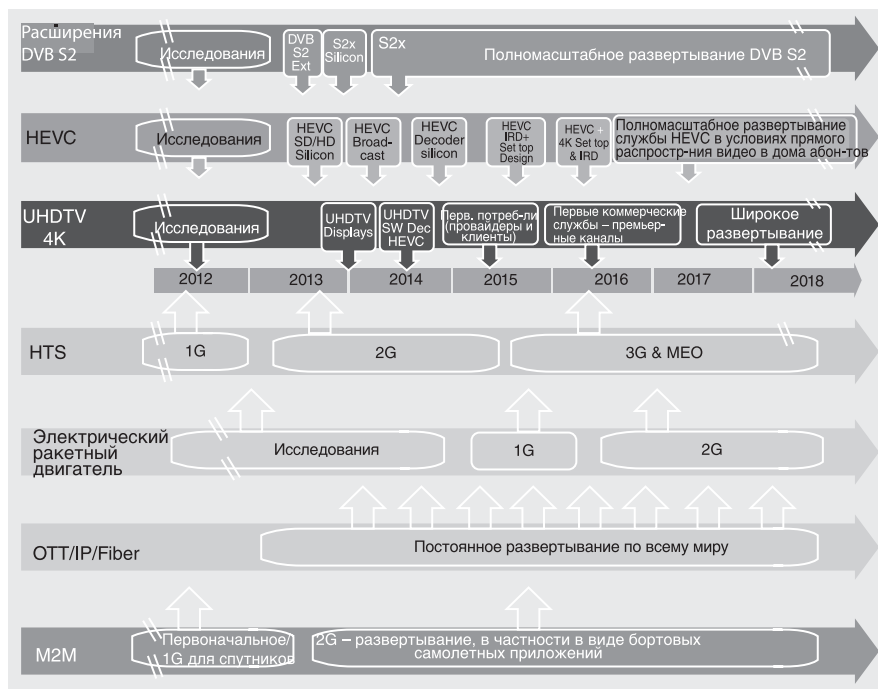


Рис. 1.2. Общая хронология ключевых достижений в области спутниковой связи

1.3. Основы спутниковой связи

В данном разделе рассматриваются некоторые основные понятия в области спутниковой связи с тем, чтобы сделать эту книгу относительно самостоятельным учебным пособием.

1.3.1. Спутниковые орбиты

Спутники связи совершают обороты вокруг Земли («летают», на научном жаргоне) по четко определенным орбитам. В табл. 1.1 (примерно скомбинированной из данных литературных источников [GEO200101] и [SAT200501]) перечислены некоторые ключевые понятия, связанные с орбитами, которые расширяют то краткое введение об орбитах, представленное ранее. Рис. 1.3 графически иллюстрирует различные спутниковые орбиты, которые находятся в общем пользовании. Большинство коммерческих спутников, обсуждаемых в данной книге, постоянно находятся на ГСО. На практическом уровне, ГСО имеет небольшой ненулевой наклон и эксцентриситет, что заставляет находящийся на ГСО спутник двигаться по небольшой, но управляемой траектории в виде «восьмерки». При штатной работе спутники «сохраняют стационарное положение» в пределах определенного «поля» вокруг назначенной орбитальной позиции; со временем (при приближении события окончания срока эксплуатации спутника — обыч-

но через 15–18 лет после запуска) спутнику «разрешается» войти по наклонной орбите в непосредственную близость от назначенной орбитальной позиции (если его не перемещают в другую позицию на ГСО для обслуживания): маневры север-юг для удержания космического аппарата в центральном поле не предпринимаются (для экономии топлива), но сохраняются маневры восток-запад, чтобы сохранить орбитальную позицию. Орбитальные позиции определяются международными правилами как значения долготы на геосинхронной «окружности», например 101° з. д., 129° з. д. и т. д. Спутники (в настоящее время) разнесены на 2° (или 9° для DBS), чтобы обеспечить достаточное разделение для поддержки повторного использования частот, хотя в некоторых приложениях созвездие спутников может быть сосредоточено (практически) в одном месте (но каждый из них использует другой частотный спектр). В действительности, орбитальная позиция является «полем» размером около 150 км на 150 км, в пределах которого спутник находится в ведении наземного контроля. Спутники не на ГСО используются для таких приложений, как радиослужбы спутниковой связи, GPS зондирование Земли, а также в военных целях; тем не менее, также появляются службы коммерческой связи; спутники, которые работают на орбитах «Молния», СОО или МОО, увеличивают пропускную способность сети, снижают затраты и в сочетании с более совершенными наземными антеннами обеспечивают непрерывное обслуживание (на самом деле, это и есть аргумент, чтобы с помощью нескольких спутников обеспечить возможность быстрого восстановления в случае аварии).

Основным последствием движения спутника по ГСО является задержка распространения сигналов не менее 119 мс в восходящей линии связи (больше для наземных станций в северных широтах или для наземных станций, которые, находясь на линии видимости спутника, все же значительно смещены в меридиональном направлении¹), и не менее 238 мс для восходящей и нисходящей линий связи или односторонней передачи по сквозной линии. Двусторонний интерактивный сеанс с типичным протоколом связи, таким как *протокол управления передачей* (TCP — Transmission Control Protocol) будет испытывать эту задержку дважды в течение каждого периода (не менее чем 476 мс), так как информация проходит два раза на спутник и обратно. Односторонние или вещательные (передача видео или данных) приложения легко справляются с этой проблемой, поскольку задержка незаметна для зрителя видео или пользователя принимаемых данных. Тем не менее интерактивные приложения передачи данных и транзитные соединения передачи голоса обычно должны принимать и подстраиваться к этому затруднительному положению, накладываемому ограничениями скорости света, поскольку с такой же скоростью распространяются радиоволны. Спутниковые узлы компенсации задержки и технологии имитации соединений (спуфинг) были успешно использованы для компенсации этих задержек в схемах передачи данных. Передача голоса через спутник в настоящее время составляет лишь малую долю от общей мощности транспондера, а пользователям приходится справляться с задержкой спутника индивидуально в каждом случае, и лишь немногие находят такую ситуацию нежелательной.

¹ В зависимости от места нахождения земной станции и целевого спутника (который определяет угол обзора), длина пути (и, следовательно, задержка распространения сигнала) может изменяться на несколько тысяч километров (например, для спутника на 101° з. д. и антенны в Denver Co. «наклонная» дальность составляет 37 571,99 км; для антенны в Van Buren, ME, дальность составляет 389 59,54 км).

Таблица 1.1. Основные понятия, связанные с орбитами

Круговая орбита	Орбита спутника, на которой расстояние между масс спутника и Земли постоянно.
Пояс (орбита) Кларка	Круговая (геостационарная) орбита на высоте приблизительно 35 786 км над экватором, по которой спутники движутся с той же угловой скоростью, что и Земля в ходе своего вращения, поэтому кажутся неподвижными для наблюдателя на Земле (термин получил название в честь Артура Кларка, который первым описал концепцию геостационарных спутников связи).
Совмещенные спутники	Два или более спутника, занимающих примерно одну и ту же позицию на <i>геостационарной орбите</i> таким образом, что угловое расстояние между ними является фактически нулевым, если смотреть с Земли. Небольшая приемная антенна будет воспринимать спутники как совмещенные; в действительности, спутники находятся в нескольких километрах друг от друга в пространстве, чтобы избежать столкновений. На этих спутниках используются различные рабочие частоты и/или поляризация сигнала.
Гелиосинхронная орбита	Особая телиосинхронная (SS — sun-synchronous) орбита, на которой спутник постоянно движется за тенью Земли. Поскольку спутник никогда не переходит в эту тень, он всегда находится на солнечном свете. Поэтому такие спутники могут в основном работать на солнечной энергии, а не от батарей; они полезны для сельского хозяйства, океанографии, лесного хозяйства, гидрологии, геологии, картографии и метеорологии.
Геостационарная орбита (ГСО)	Геостационарные орбиты — это круговые орбиты, которые ориентированы в плоскости экватора Земли. Геостационарный спутник совершает один оборот по орбите вокруг Земли каждые 24 часа; следовательно, учитывая, что спутник — космический аппарат, который вращается с той же угловой скоростью, что и Земля, он постоянно висит над одной и той же точкой земного шара (если только оператор не изменит его позицию). На геостационарной орбите спутник находится постоянно, т. е. для наблюдателя с земли — в неподвижном положении. Максимальная занимаемая площадь (зона обслуживания) геостационарного спутника охватывает почти одну треть поверхности Земли; на практике, однако, за исключением океанических спутников, большинство спутников имеют зону охвата, оптимизированную для континента и/или части континента (например, Северной Америки или даже континентальной части США).
Геостационарный спутник	Спутник на околоземной орбите, движущийся с той же скоростью, что и Земля, он выглядит неподвижным относительно земной поверхности.
	НКО обычно имеют перигей (точка на каждой орбите, которая находится ближе всего к Земле) примерно в 500 км над поверхностью Земли и апогей (точка на орбите, которая является самой дальней от Земли), который достигает 50 000 км. Орбиты наклонены под углом 63,4° с целью предоставления услуг связи в местах, расположенных в высоких северных широтах. Период обращения колеблется от 8 до 24 ч. Благодаря высокому эксцентриситету орбиты спутник проводит около двух третей орбитального периода вблизи апогея, и в течение этого времени выглядит почти.

Таблица 1.1 (продолжение)

Сильно вытянутые эллиптические орбиты (НЕО — Highly elliptical orbits)	неподвижным для наблюдателя на Земле (это называется задержкой апогея). Хорошо спроектированная система НЕО размещает каждый апогей в соответствии с нужной зоной обслуживания. После прохождения спутником апогейного периода орбиты происходят переключения на другой спутник на той же орбите, чтобы избежать потери связи. Из-за относительно большого перемещения спутника на НЕО по отношению к наблюдателю на Земле, спутниковые системы, использующие этот тип орбит, должны компенсировать доплеровский сдвиг (частоты несущего радиосигнала). Примером системы НЕО является российская система «Молния», в которой используется три спутника на трех 12-часовых орбитах, разделенных 120° на орбите вокруг Земли с расстоянием апогея 39 354 км и перигея 1000 км.
Наклонение	Угол между плоскостью орбиты спутника и плоскостью экватора Земли. Орбита идеального геостационарного спутника имеет наклонение 0°.
Наклонная орбита	Орбита, которая по своим параметрам приближается к геостационарной орбите, но ее плоскость слегка наклонена по отношению к экваториальной плоскости. Если смотреть с поверхности Земли, создается впечатление, что спутник движется в своей номинальной позиции по суточной «траектории в виде восьмерки». Космическим аппаратам (спутникам) часто допускается дрейфовать по наклонной орбите ближе к концу их номинального срока эксплуатации в целях экономии топлива на борту, которое в ином случае использовалось бы для коррекции этого естественного дрейфа, вызванного притяжением Солнца и Луны. Маневры север-юг не проводятся, чтобы следовать по орбите, которая должна быть сильно наклонена.
Низкая околоземная орбита (НОО)	НОО представляют собой либо эллиптические, либо (чаще) круговые орбиты, которые находятся на высоте 2000 км или менее над поверхностью Земли. Период орбиты на этих высотах колеблется в пределах от 90 мин до 2 ч, а максимальное время, в течение которого спутник на НОО находится над местным горизонтом для наблюдателя на Земле, составляет до 20 мин. При нахождении на НОО существуют длинные периоды, в течение которых данный спутник находится вне поля зрения конкретной наземной станции; это может оказаться приемлемым для некоторых приложений, например, для мониторинга наземной поверхности. Зона радиовидимости может быть расширена за счет развертывания более одного спутника и в нескольких орбитальных плоскостях. Полная глобальная система действия радиосвязи с использованием НОО требует большого количества спутников (40–80), находящихся в нескольких орбитальных плоскостях и на различных наклонных орбитах. Большинство малых систем со спутниками НОО используют полярные или приполярные орбиты. Из-за относительно большого движения спутника по НОО по отношению к наблюдателю на Земле спутниковые системы, использующие этот тип орбиты, должны быть в состоянии компенсировать доплеровские сдвиги. Спутникам на НОО также приходится преодолевать сопротивление атмосферы, что вызывает ухудшение параметров орбиты (типичный срок существования спутника на НОО составляет 5–8 лет, в то время как типичный срок существования спутника на ГСО — 14–18 лет). Тем не менее запуски спутников на НОО менее затратны, чем на ГСО, а из-за их более легкого веса за один запуск можно одновременно запустить несколько спутников на НОО.

Таблица 1.1 (продолжение)

Средние околоземные/промежуточные круговые орбиты (СОО/ПКО)	Эти круговые орбиты находятся на высоте около 10 000 км. Их период составляет в диапазоне от 6 часов. Максимальное время, в течение которого спутник на СОО находится выше местного горизонта для наблюдателя на Земле, составляет несколько часов. Глобальная система связи с использованием этого типа орбит требует небольшого количества спутников в двух или трех орбитальных плоскостях для достижения глобальной зоны охвата. Американская GPS является примером системы спутников на СОО.
Орбита системы «Молния»	См. сильно вытянутые эллиптические орбиты (ВЭО). Орбита «Молния» (названная в честь серии советских/российских спутников связи «Молния», которые используют этот тип орбиты с середины 1960-х годов) представляет собой тип ВЭО с наклонением $63,4^\circ$, аргумент перигея составляет -90° , а орбитальный период — половину звездных суток.
Орбита	Путь, описываемый центром масс спутника в пространстве, под действием природных сил, главным образом гравитационного притяжения, но время от времени и низкоэнергетических корректирующих сил, вызываемых двигателями, для достижения и поддержания требуемой траектории.
Орбитальная плоскость	Плоскость, в которой находятся центр массы Земли и вектор скорости (направление движения) спутника.
Полярная орбита	Полярные орбиты представляют собой НОО, которые находятся в плоскости двух полюсов. Их приложения включают в себя возможность обзора только полюсов (например, заполнить пробелы в зоне охвата спутников на ГСО) или просмотр одного и того же места на Земле в определенное время каждые сутки. Размещающий спутник на высоте около 850 км, можно достичь периода полярной орбиты примерно 100 мин (для получения непрерывной зоны радиовидимости используется больше одного спутника на полярной орбите).
Гелиосинхронная (SS) орбита	Особая полярная орбита, двигаясь по которой спутник пересекает экватор и каждый градус широты в одно и то же время суток, называется гелиосинхронной орбитой; эта орбита значительно облегчает сбор данных. Спутники на полярных орбитах в основном используются для приложений зондирования Земли. Как правило, такой спутник движется на высоте 1000 км. Угол между плоскостью гелиосинхронной орбиты и Солнцем остается постоянным. Движение по этой орбите может быть достигнуто путем соответствующего выбора орбитальной высоты, эксцентриситета и наклона, что вызывает прелесию (вращения узла) орбиты приблизительно на 1° на восток каждый день, что равняется видимому движению Солнца; это условие может быть достигнуто только для спутника на ретроградной орбите. Как уже отмечалось, гелиосинхронная маловысотная полярная орбита широко используется для мониторинга Земли, потому что каждый день по мере вращения Земли вся ее поверхность будет оказываться в зоне обзора спутника, поэтому он будет совершать обзор одного и того же места в одно и то же время каждые сутки. Все гелиосинхронные орбиты являются полярными, но не все полярные орбиты являются гелиосинхронными.

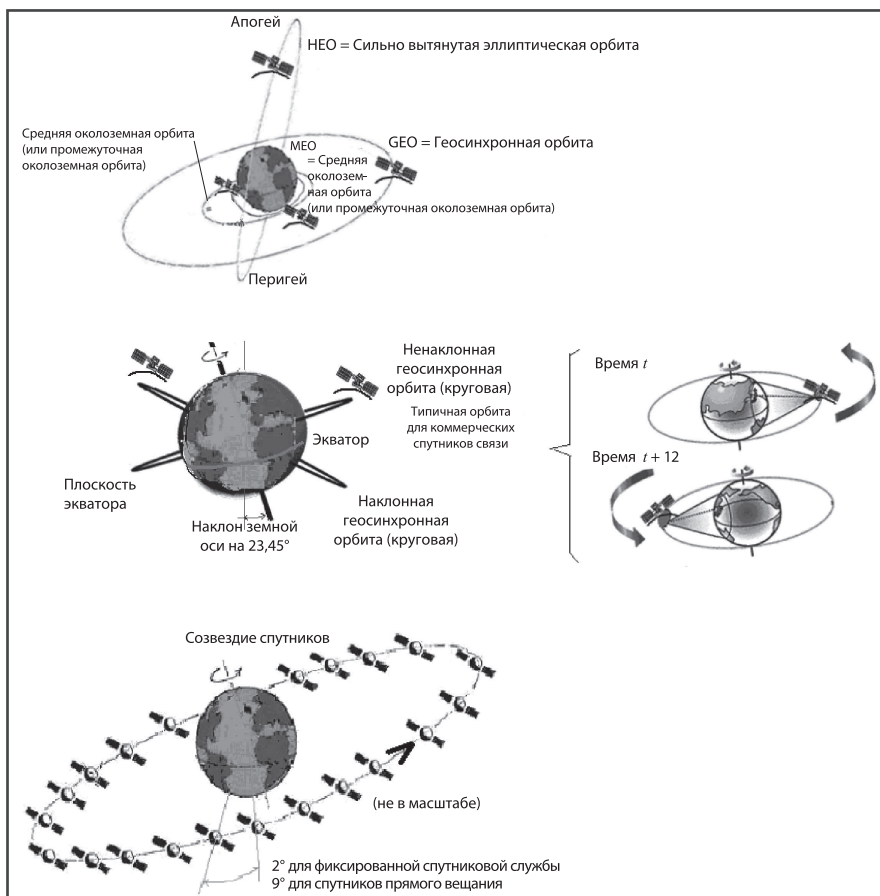


Рис. 1.3. Геосинхронная орбита и траектория движения спутника. МТО = средняя околоземная орбита (или промежуточная околоземная орбита)

На рис. 1.4 показана хронология запуска спаренного набора спутников, составленная на основе материалов International Launch Services (ILS), не охраняемых авторским правом.

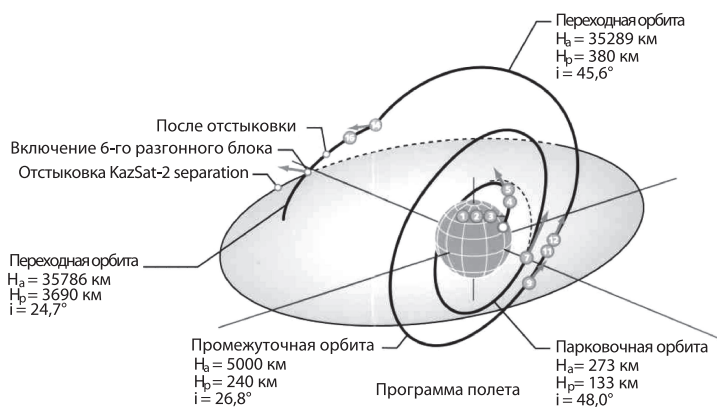


Рис. 1.4. Запуск космического аппарата. Предоставлено: International Launch Services Inc



Рис. 1.4 (продолжение).

ILS обеспечивает управление полетом в целом и услуг по запуску для глобальной коммерческой спутниковой индустрии с использованием основного транспортного средства вывода на орбиту тяжелых грузов с использованием ракет-носителей «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз М» (Россия). Эта компания является одной из трех основных компаний, обеспечивающих оборудование для запуска коммерческих спутников. Запуски ракеты-носителя «Протон-М» производятся с космодрома Байконур, эксплуатируемого Российским космическим агентством (Роскосмос) в рамках долгосрочной аренды у Республики Казахстан.

1.3.2. Диапазон радиочастот спутниковой ретрансляции данных

Спутниковый канал связи является каналом радиосвязи между передающей и приемной наземными станциями через спутник связи¹. Спутниковый канал связи состоит из восходящей и нисходящей линии связи; спутниковое электронное оборудование (т. е. транспондер) будет преобразовывать частоту восходящей линии связи в частоту нисходящей линии связи. Канал передачи спутниковой системы является радиоканалом, работающим в конкретных радиочастотных диапазонах в пределах общего электромагнитного спектра (рис. 1.5 [MIN199101]). Табл. 1.2 содержит сведения о некоторых ключевых физических параметрах, имеющих отношение к спутниковой связи. Рабочая частота является *сверхвысокой частотой* (СВЧ, SHF) диапазона (3–30 ГГц). Регулирование и практика определяют рабочую частоту, полосу пропускания канала, а также полосу пропускания подканалов в пределах большего канала. Для восходящей и нисходящей линий связи используются разные частоты.

Частоты выше примерно 30 МГц способны проходить через ионосферу, и, следовательно, могут использоваться для осуществления связи со спутниками (частоты ниже 30 МГц отражаются от ионосферы на определенных этапах цикла солнечной активности, однако коммерческие спутниковые службы используют гораздо более высокие частоты). Диапазон 3–30 ГГц представляет собой полезный набор частот для геостационарной спутниковой связи; эти частоты также называют «сверхвысокими частотами»². При частотах выше примерно 30 ГГц ослабление сигнала в атмосфере из-за облачности, дождя, гидрометеоров, песка и пыли де пор не разработаны для коммерческого применения³) [JEF200401].

¹ Таким образом на спутнике размещается приемо-передатчик (транспондер, ретранслятор) с соответствующими приемной и передающей антеннами, и такой спутник выполняет функцию спутника-ретранслятора. — *Прим. ред.*

² Частоты от 30 до 300 ГГц называют частотами «миллиметрового» диапазона; выше 300 ГГц на первый план выходят оптические методы, их называют частотами «дальнего инфракрасного диапазона» или «квазиоптическими частотами».

³ В военной сфере появляются новые приложения: современная высокочастотная спутниковая система (АЕНФ — Advanced Extremely High Frequency) представляет собой систему объединенной службы спутниковой связи правительства США, состоящую из четырех спутников (три из которых были запущены в 2014 году), которая использует спектр КВЧ; эта система спутниковой связи направлена на обеспечение глобальной, безотказной, безопасной, защищенной и помехоустойчивой связи для высокоприоритетных военных наземных, морских и воздушных средств. По данным ВВС США, АЕНФ позволяет Совету национальной безопасности и Объединенному боевому командованию (Unified Combatant Commanders) контролировать свои тактические и стратегические силы на всех уровнях конфликта в случае всеобщей ядерной войны и поддерживает достижение информационного превосходства.

Фактические рабочие частоты коммерческих спутников (США)¹:

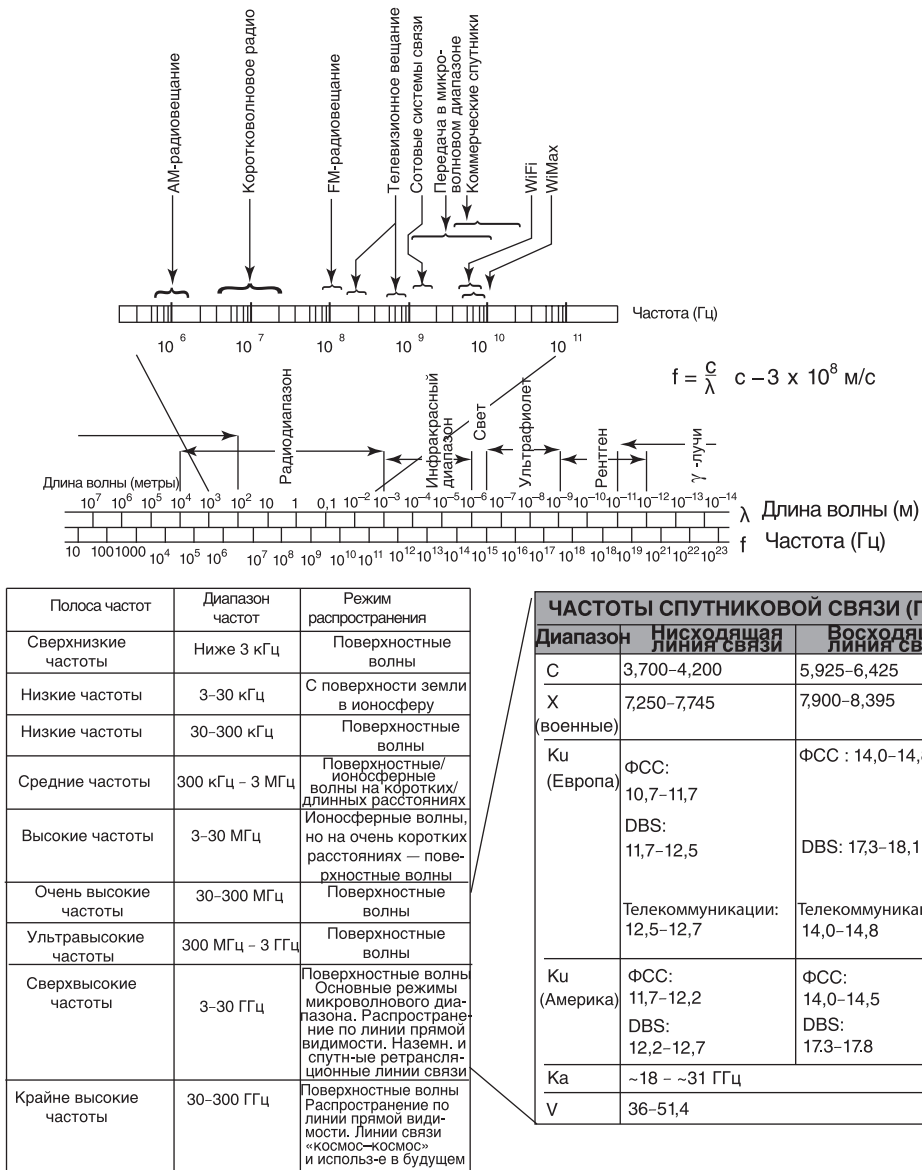


Рис. 1.5. Электромагнитный спектр и диапазоны

- С-диапазон: 3,7–4,2 ГГц для частот нисходящей линии связи и 5,925–6,425 ГГц для частот восходящей линии связи;

¹ Международный набор полос СВЧ выглядит следующим образом: L-диапазон (0,39–1,55 ГГц); S-диапазон (1,55–5,20 ГГц); C-диапазон (3,70–6,20 ГГц); X-диапазон (5,20–10,9 ГГц); K-диапазон (10,99–36 ГГц).

- Ку-диапазон: 11,7–12,2 ГГц для частот нисходящей линии связи и 14–14,5 ГГц для частот восходящей линии связи;
- BSS: 12,2–12,7 ГГц для частот нисходящей линии связи и 17,3–17,8 ГГц для частот восходящей линии связи;
- Ка-диапазон: 18,3–18,8 ГГц и 19,7–20,2 ГГц для частот нисходящей линии связи, а также между 28,1–28,6 ГГц и 29,5–30 ГГц для восходящей линии связи (другие конкретные частоты также можно использовать, как описано в главе 3, некоторые дополнительные услуги на более высоких частотах до 40 ГГц или даже выше возможны в будущем).

Таблица 1.2. Некоторые ключевые физические параметры, имеющие отношение к спутниковой связи

Частота	Количество повторений электрического или электромагнитного сигнала в течение определенного промежутка времени. Частота, как правило, выражается в герцах (Гц) (циклах в секунду). Частоты спутниковой передачи находятся в гигагерцовом (ГГц) диапазоне
Полоса частот	Диапазон частот, используемых для передачи или приема радиоволн (например, 3,7–4,2 ГГц).
Частотный спектр	Непрерывный диапазон частот
Герц (Гц)	Единица измерения частоты в СИ, эквивалентная одному циклу в секунду. Частота периодического явления, которое имеет период повторения 1 с
Кельвин (К)	Единица измерения термодинамической температуры в СИ
Мега-символ/с	Единица измерения скорости передачи для радиосвязи, равная 1 000 000 символов/с. Фактическая пропускная способность канала связана с применяемой схемой модуляции
Символ	Уникальное состояние сигнала схемы модуляции, используемой на линии передачи, которое кодирует один или несколько битов информации для приемника
Ватт (Вт)	Единица измерения мощности, равная 1 Дж/с

СИ — Systeme International d'Unites (Международная система единиц).

Таблица 1.3. Диапазоны спутниковой связи, общее представление, стандарт IEEE 521–1984

Обозначение диапазона	Частота (ГГц)	Длина волны в космосе
L-диапазон	1–2	30,0–15,0
S-диапазон	2–4	15–7,5
C-диапазон	4–8	3,8–2,5
X-диапазон	8–12	2,5–1,7
Ku-диапазон	12–18	1,7–1,1
K-диапазон	18–27	1,1–0,75
Ka-диапазон	27–40	0,75–0,40
V-диапазон	40–75	0,40–0,27
W-диапазон	75–110	

Следует отметить, что Международный союз электросвязи (МСЭ) разделил мир на три области (рис. 1.6):

- Регион 1: Европа, Ближний Восток, Россия и Африка;
- Регион 2: Северная и Южная Америка;

- *Регион 3: Азия, Австралия и Океания.*

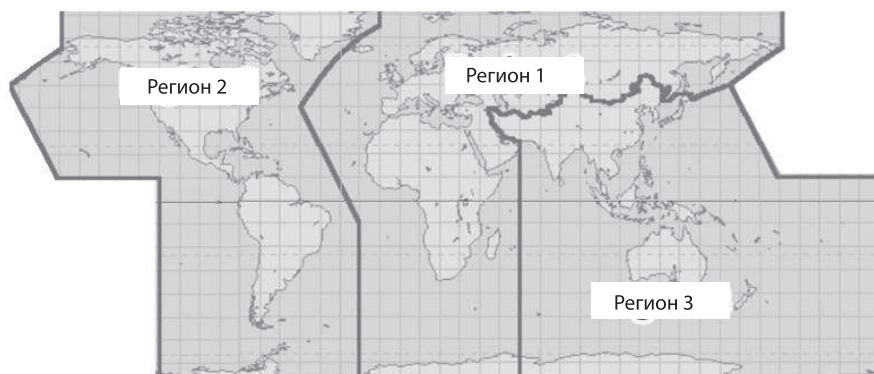


Рис. 1.6. Регионы согласно распределению частот МСЭ

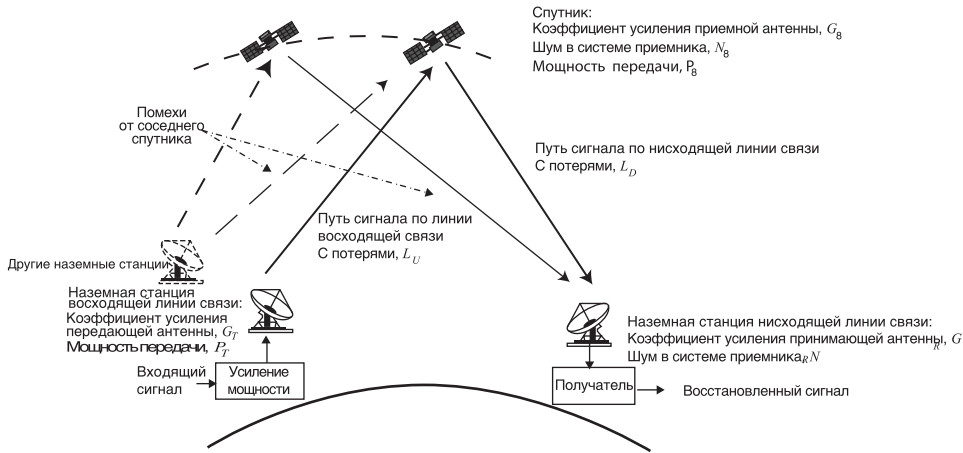
Рисунок 1.7 представляет некоторую дополнительную информацию о полосах частот.

Таблица распределения частот, содержащихся в статье 5 Регламента радиосвязи (PP, RR — Radio Regulations), назначает полосы частот службам радиосвязи в каждом из трех регионов МСЭ на основе различных категорий услуг, как это определено в РР. Есть некоторые различия в разных странах; однако С- и Ku-диапазоны, как правило, сопоставимы.

Полосы частот подразделяются на более мелкие каналы, которые могут работать независимо друг от друга при использовании для различных применений. На рис. 1.8 изображено типичное разбиение С-диапазона на эти каналы, которые также называют в просторечии как «транспондеры» (термин «транспондер» определен далее в разделе). Номинальная полоса пропускания подканала (обычно) составляет 40 МГц с полезной (типичной) шириной полосы 36 МГц. Аналогичные распределения частот были установлены для диапазонов Ku и Ka. Многие спутники одновременно поддерживают инфраструктуры диапазонов С и Ku (они имеют специальные каналы и ретрансляторы для каждого диапазона). Большинство систем связи относятся к одной из трех категорий: эффективное использование ширины полосы пропускания, мощности или затрат. Эффективное использование ширины полосы пропускания характеризует способность схемы модуляции размещать данные в пределах ограниченной ширины полосы частот. Эффективное использование мощности характеризует способность системы надежно передавать информацию с заданной величиной достоверности (допустимым количеством ошибок на один бит информации) на самом низком практическом уровне мощности. В спутниковой связи все показатели — эффективность использования полосы пропускания, КПД и мощность радиопередающего устройства — являются очень важными [AGI200101].

Спутники обычно поддерживают несколько лучей, довольно типичным является использование от полудюжины до дюжины лучей. Это позволяет использовать одинаковые частоты одновременно в разных лучах («Повторное использование частот¹») Эти лучи реализуются с использованием различных антенн

¹ Повторное использование частот см. стр. 420 в приложении В



Диапазон	Характеристики	Примечания
С-диапазон (6 ГГц в восходящей и 4 ГГц по нисходящей линии)	- Относ. устойчив к атмосферн. воздействиям. - Популярн. диапазон, но периодически становится слишком заполненным - Ш-на полосы (ретранслят. ~ на 500 МГц/36 МГц) позволяют принимать видео и передавать данные с высокой скоростью - Ш-на полосы (ретранслят. ~ на 500 МГц/36 МГц) позволяют принимать видео и передавать данные с высокой скоростью - Обесп. высокую пропускную способность при передаче видео - Надежная технология с давней историей и хорошими результатами	- Требует больших антенн (3,8–4,5 м или больше, особенно со стороны передачи) - Большая зона охвата луча - Лучший по производительности диапазон с точки зрения ослабления сигнала в дождевых осадках - Потенциальные помехи из-за наземных микроволновых систем
Ки-диапазон (14–14,5 ГГц в восходящей и 1,7–12,2 ГГц по нисходящей линии)	- Удовлетворительно работает с дешевым оборудованием - Хорошо подходит к VSAT-сети - Зона охвата точечного луча позволяет использовать небольшие наземные терминалы, 1–3 м шириной для регионов с умеренными дождевыми осадками	- Ослабление в дождевых и других атмосферных осадках - Зона охвата луча в основном сфокусирована на суше - Не идеально подходит для дождливых регионов
DBS-диапазон (17,3–17,8 ГГц в восходящей и 12,2–12,7 ГГц по нисходящей линии)	- Симплексная система - Множество фидеров для доступа к соседним спутникам - Небольшие RO-антенны - Передача ТВ видео потребителям	Ослабление сигнала в дождевых и других атмосферных осадках
Ка-диапазон (18,3–18,8 ГГц и 19,7–20,2 ГГц в нисходящей и 28,1–28,6 ГГц и 29,5–30,0 ГГц по восходящей линии)	- Микрозона охвата луча - Очень малые терминалы, значительно меньше 1 м - Высокая скорость передачи данных на уровне 500–1000 Мбит/с - Спутники с высокой пропускной способностью	- Ослабление в дождевых осадках - Препятствующие помехи из-за сильных дождевых осадков (отключение)

Рис. 1.7. а — Факторы и диапазоны спутниковой передачи; б — дополнительные подробности частотных диапазонов для региона 2

и/или отдельных каналов на одной антенне. Каждый точечный луч многократно использует имеющиеся частоты (и/или поляризации), поэтому один спутник может обеспечить повышенную пропускную способность. В неперекрывающихся областях частоты могут быть полностью повторными; в перекрывающихся областях должны быть использованы неконфликтующие частоты (рис. 1.9 для примера). HTS поддерживает до 100 лучей в неперекрывающихся географических районах, тем самым значительно увеличивая общую полезную пропускную способность.

Стандартные частоты	Канал*	Канал нисходящей линии связи	Описание	Размер антенны	Доступность
	С ФСС (стандартный)	4,2 3,7	Основные частоты спутниковой связи Низкое ослабление сигнала в дождевых осадках Высокая надежность при использовании больших антенн Пример применения: кабельное ТВ	3–4,5 м для узлов кабельной связи	99,95
	Х-диапазон	7,75 7,25	Диапазон военного назначения	Различный	99,95
	Расширенный Ки-диапазон	11,45 10,7	Распределение 1 ГГц на две группы частот Не используется в связи со средней мощностью, законодательными ограничениями, наземными помехами при угловом расстоянии между спутниками 2°	75–95 см	99,9
	Стандартный Ки-диапазон ФСС	12,2 11,7	VSAT-приложения с небольшими антеннами 500 МГц используются для передачи компьютерного видео (международными) службами. Угловое расстояние между спутниками 2°	75–95 см	99,9
Специальные частоты	Ки-диапазон BSS US DBS	12,7 12,2	Приложения для прямой трансляции видео (высокая мощность) 500 МГц от двух генераторов Умеренное ослабление в дождевых осадках Большое угловое расстояние между спутниками 4,5–9°	45–55 см	99,85–99,9
	Ка-диапазон BSS US RDBS	17,8 17,3	Дополнительный Ка-диапазон доступен в качестве дополнительного к диапазону Ки BSS для приложений прямой трансляции видео (DTH) (D/L 17,3–17,8 ГГц, U/L 24,75–25,25 ГГц). В большинстве стран Северной и Южной Америки этот диапазон (без FS (?)) в полосе частот используется для прямой трансляции видео (для восходящей линии связи нужна большая антенна). Умеренное ослабление сигнала в дождевых осадках. Расстояние между спутниками примерно 4° позволяет легко настраивать небольшую приемную антенну-тарелку (ФСС). Спутники, работающие в Ка-диапазоне BSS, не могут осуществлять совместную работу со спутниками, работающими в Ки-диапазоне BSS (требуется минимальное угловое расстояние между спутниками 0,3°, чтобы исключить помехи)	50–60 см При угловом расстоянии между спутниками 4° необходима высокая мощность и антенна размером 50 см При угловом расстоянии между спутниками 2–3° необходима антенна размером 60 см и более	99,85–99,9
	Ка-диапазон низких частот ФСС Ка-диапазон высоких частот ФСС	1 ГГц распределен на две группы частот: 18,3–18,8 ГГц 119,7–20,2 ГГц (основная)	DIRECTV использует полосу низких частот Угловое расстояние между спутниками 2° Значительное ослабление сигнала в дождевых осадках	70–80 см	99,8–99,9
Частоты будущего применения	Q-диапазон V-диапазон	50–33 75–50	Приложения будущего	В разработке	В разработке

*Спектр спутниковой связи в регионе 2 по классификации МСЭ.

Рис. 1.7 (окончание).

На рис. 1.10 изображена двухсторонняя спутниковая связь. Сквозное соединение (от удаленной точки к центральной) использует радиоканал, как было описано выше, со стороны восходящей линии связи сигнал идет от передающей наземной станции к спутнику; кроме того по нисходящей линии связи радиоканал работает на принимающую наземную станцию (его также обычно называют входящей связью). Исходящая связь — от центральной точки к удаленной — также использует радиоканал, который содержит восходящую и нисходящую линии связи.

С точки зрения приложения, связь может иметь тип «точка-точка» (эффективно, когда обе конечные точки линии являются равноправными) или это может быть связь типа «точка-агрегация точек», например для передачи обслуживания корпоративной сети или сети интернет. Некоторые приложения — симплексные, как правило, используют исходящую связь; другие приложения являются дуплексными (как вариант — двунаправленными), использующими как входящую, так и исходящую связь.

В настоящее время в спутниковой связи почти исключительно используется цифровая модуляция. Модуляция представляет собой процесс наложения инфор-