

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт"

А.А. Зеленский, В.Ф. Солодовник

ТЕХНОЛОГИИ СПУТНИКОВЫХ СРЕДСТВ СВЯЗИ

4 курс, заочное отделение

Харьков "ХАИ" 2004

Библиографический список

1. Регламент радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1985.Т.1. – 509 с.
2. Чернявский Г.М., Бартенев В.А. Орбиты спутников связи. – М.: Связь, 1978. – 224 с.
3. Калашников Г.М. Системы связи через искусственные спутники Земли. М.: Связь, 1969. – 354 с.
4. Радиотехнические системы передачи информации: Учеб. пособие для вузов / Под ред.В.В. Калмыкова. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
5. Радиорелейные и спутниковые системы передачи: Учебник для вузов / Под ред. А.С. Немировского. – М.: Радио и связь, 1986. – 392 с.
6. Сухопутная подвижная радиосвязь / Под ред. В.С. Семенихина. – М.: Радио и связь, 1990. – 432 с.
7. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. – М.: Связь, 1979. – 592 с.
8. Системы спутниковой связи: Учеб.пособие для вузов / Под ред. Л.Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1992. – 224 с.
9. Справочник по спутниковой связи и вещанию / Под ред. Л.Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1983. – 288 с.
10. Рекомендации и отчеты МККР. Т. 4. Ч. 1. Фиксированная спутниковая служба. – Дубровник, 1986. – 560 с.

Виды радиосвязи и классификация систем связи

Различают два основных вида радиосвязи – космическую и наземную. *Космическая радиосвязь* – это радиосвязь, в которой используется одна или несколько космических радиостанций или один или несколько пассивных спутников, или другие космические объекты. *Наземная радиосвязь* – радиосвязь, в которой применяют радиостанции, находящиеся на поверхности Земли и в основной части земной атмосферы, исключая космическую радиосвязь и радиоастрономию. *Спутниковая радиосвязь* – это космическая радиосвязь между земными радиостанциями, осуществляемая путем ретрансляции радиосигналов через один или несколько спутников земли. Как для наземных, так и для спутниковых РСПИ устанавливают принадлежность к той или иной службе связи (рис. 1).

Помимо принадлежности к той или иной службе и назначения (см. рис. 1), классификация РСПИ может быть проведена и по другим признакам, которые заложены в ее основу, например, по диапазону используемых частот, виду линейного сигнала, виду модуляции несущей, способу разделения каналов и т.д. Кроме того, одним из таких признаков является характер используемого физического процесса в тракте распространения радиоволн. По этому признаку различают *радиорелейные системы передачи прямой видимости* (РРСП) (распространение радиоволн в тропосфере в пределах прямой видимости); *тропосферные радиорелейные системы передачи* (ТРСП) (дальнее тропосферное распространение радиоволн вследствие их рассеяния и отражения в нижней области тропосферы при взаимном расположении радиорелейных станций за пределами прямой видимости); *ионосферные системы передачи на дециметровых волнах* (дальнее распространение дециметровых волн за счет отражения от слоев ионосферы); *космические системы передачи* (прямолинейное распространение радиоволн в космическом пространстве и атмосфере Земли); *ионосферные системы передачи на метровых волнах* (дальнее распространение метровых волн благодаря рассеянию их на неоднородностях ионосферы), *наземные системы ВЧ, ОВЧ и УВЧ*, работающие в приземных слоях атмосферы в диапазонах частот от 30 до 3000 МГц и др.

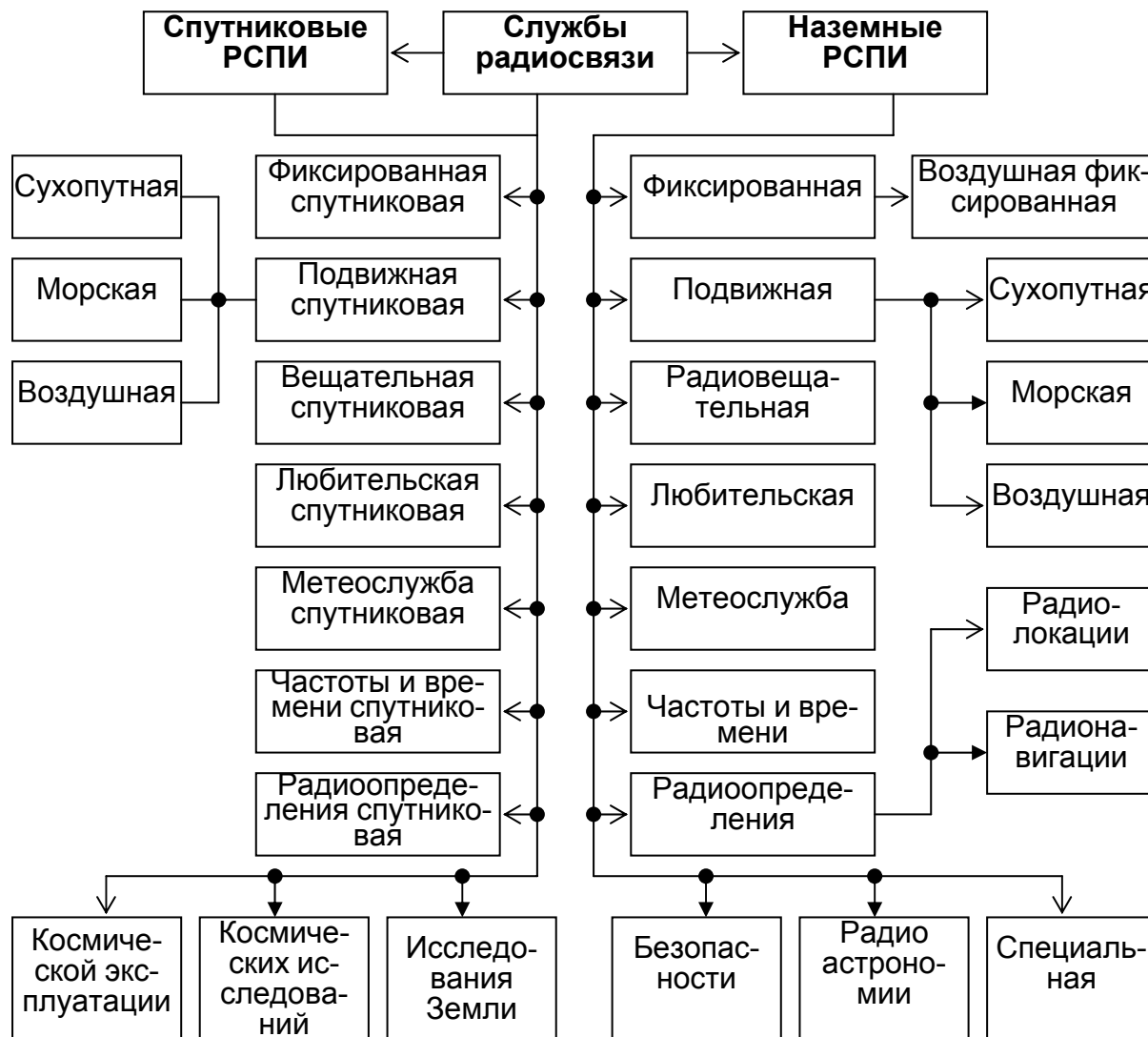


Рис. 1

Радиорелейные системы передачи прямой видимости и спутниковые системы связи (ССС) по способу построения имеют много общего, поскольку и в том, и в другом случаях используется прямолинейное распространение радиоволн с ретрансляцией сигналов бортовым ретранслятором ИСЗ, находящегося в пределах радиовидимости земных станций, между которыми осуществляется радиосвязь, либо сигналов наземных радиостанций. Кроме того и в РРСП, и в ССС применяют многоствольный принцип построения ретрансляторов, обеспечивающий повышение пропускной способности, надежности и значительное снижение экономических затрат. Близки также и диапазоны частот, в которых работают эти системы. В частности, большинство земных станций ССС работает в диапазонах 4/11 ГГц на прием и 6/14 ГГц на передачу, а такие РРСП, как, например, "КУРС-8" и "Электроника-Связь-11-Ц" работают соответственно в диапазонах 7,9...8,4 и 10,7...11,7 ГГц.

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

В последние два десятилетия интенсивное развитие получили так называемые *сотовые системы мобильной связи*, которые условно можно выделить в отдельную категорию РСПИ, хотя формально они относятся к службе ПСС. Принцип построения этих систем основан на том, что зона обслуживания разделена на большое количество ячеек (сот), радиус которых лежит в пределах от 1,5 до 7 км. Каждую соту обслуживает отдельная базовая радиостанция небольшой мощности, расположенная в центре соты. Совокупность сот образует зону обслуживания, в центре которой размещена центральная станция, соединенная проводными или радиорелейными линиями со всеми базовыми станциями, а также с телефонной сетью общего пользования. Такая структура позволяет любому абоненту сотовой системы, а также абонентам телефонной сети общего пользования не только осуществлять голосовую связь между собой, но и обмениваться цифровыми и буквенными сообщениями, иметь выход в международные каналы и сети связи, включая Internet-сети, широко применять современные информационные технологии. Сотовые системы обладают высокой эффективностью использования спектра частот и их можно интегрировать с другими видами систем, включая спутниковые.

1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ССС

1.1. Назначение, виды и орбитальные характеристики ССС

Первые спутниковые системы связи с активной ретрансляцией сигналов появились в 1962-1963 гг., а спутниковые системы дальней связи – в 1965 году (Интелсат, США; Молния-1, СССР). В последующие годы были созданы ведомственные, национальные и международные системы, которые в зависимости от передаваемой информации можно отнести либо к многофункциональным, либо к специализированным. Первые предназначены для одновременного обмена телефонной, телеграфной, телевизионной, радиовещательной и другими видами информации; вторые – ССС для передачи информации одного или двух однородных видов, например, телевизионного вещания или теле- и радиовещания. К специализированным ССС можно также отнести ряд систем военного и гражданского применения, которые предназначены для решения задач определенного рода. Некоторые из таких систем приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Назначение	Название ССС
Гражданская дальняя связь международная региональная	INTELSAT Arik, Satconn, Westar, "Молния"
Вещательная	ATS-6, CTS, OTS, "Орбита"
Связь с объектами военного назначения	NATO, DSCS-III, Skynet
Связь с морскими объектами международная региональная	INMARSAT MARISAT, Marots
Связь с воздушными судами	AEROSTAT
Персональная связь	Iridium, Odyssey, Сигнал, Ростелесат
Спасательная служба	KOSPAS, Курс
Навигация (глобальная)	NAVSTAR, ГЛОНАСС
Исследование космического пространства	TDRSS, METEOSAT, КОСМОС
Исследование Земли	LANDSAT, Seasat, Алмаз
Радиолюбительская	OSCAR

В настоящее время ССС охватывают практически все существующие службы связи (см. рис. 1. 6), они интегрированы со многими другими системами и этот процесс интеграции непрерывно продолжается.

По территориальному признаку все ССС можно разделить на *глобальные*, зона обслуживания которых охватывает весь земной шар; *национальные*, обеспечивающие связь в отдельной стране или в группе близко расположенных стран; *региональные*, обеспечивающие связь в отдельных регионах.

По орбитальному признаку спутниковые системы разделяются на *геостационарные* (стационарные), *среднеорбитальные* (средневысотные), *низкоорбитальные* (низковысотные) и *системы связи на эллиптических орбитах*. В международной практике первые три типа систем обычно называют системами GEO, МЕО и LEO соответственно.

Геостационарные орбиты – это орбиты, расположенные на высоте примерно 36000 км, причем скорость вращения КА обеспечивают равной скорости вращения Земли. Тем самым достигают эффекта «неподвижности» КА относительно точки наблюдения, расположенной на Земле

Если ширину диаграммы направленности антенных систем КА выбрать равной $17,3^{\circ}$, то трех спутников достаточно для полного покрытия территории Земли (рис. 1.1).

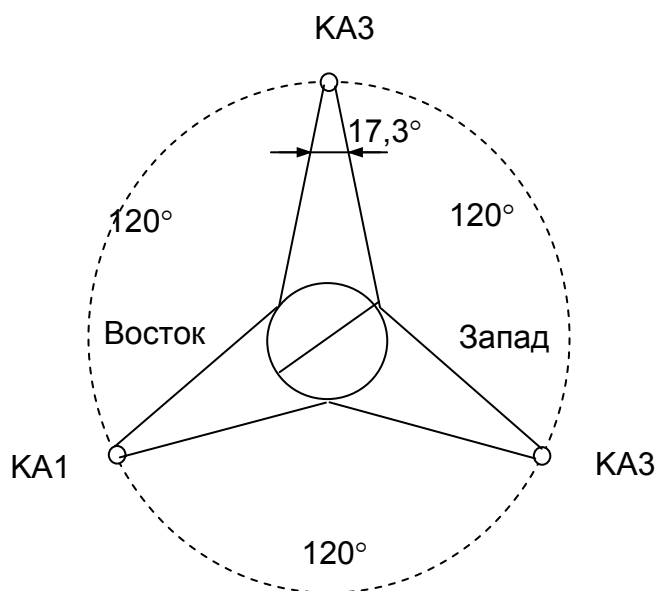


Рис. 1.1

На рис. 1.1 ориентация КА выбрана таковой, что КА1 располагается в зоне Индийского океана, КА2 – в зоне Тихого океана, а КА3 – в зоне Атлантического океана.

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

Достоинства геостационарных ССС:

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

- возможность непрерывной связи в глобальной зоне обслуживания;
- практическое отсутствие доплеровского сдвига частоты, обусловленного взаимным перемещением КА и Земли;
- сравнительно низкие энергетические затраты на коррекцию траектории движения КА и его удержание на орбите в заданной точке орбиты. (Следует отметить, что, находясь на геостационарной орбите, КА, как, впрочем, и любые другие орбитальные КА, испытывает воздействие гравитационных полей Луны и Солнца, причем влияние Луны больше примерно в три раза. Эти поля вызывают суточные колебания радиуса орбиты, приводящие к накоплению наклона плоскости орбиты примерно на величину $0,85^\circ/\text{год}$. За 26,6 лет угол склонения орбиты без коррекции может измениться от 0° до $14,67^\circ$, причем в последующие 26,6 лет угол склонения орбиты опять уменьшится до 0°).

Недостатки геостационарных ССС.

- большой уровень задержки сигналов (до 600 мс), связанный с конечным временем распространения радиоволн;
- геостационарные КА не позволяют обеспечить связь в высокоширотных районах и для их охвата требуются эллиптические орбиты с апогеем в северном полушарии (~ 40 тыс. км) и перигеем в Южном полушарии ($\sim 400\dots 600$ км), а наклонение плоскости орбиты должно составлять примерно $63,4^\circ$ (например, для СС “Молния”);
- необходимость достаточно высокой энергетики, что затрудняет персональную связь.

Средневысотные ССС являются промежуточным звеном между геостационарными и низкоорбитальными. КА средневысотных ССС располагаются в основном на круговых орбитах, находящихся на высотах от 5000 до 15000 км. Для полного покрытия территории Земли требуется 7-12 КА. Упрощенная схема организации охвата территории Земли в средневысотных и низкоорбитальных ССС изображена на рис. 1.2.

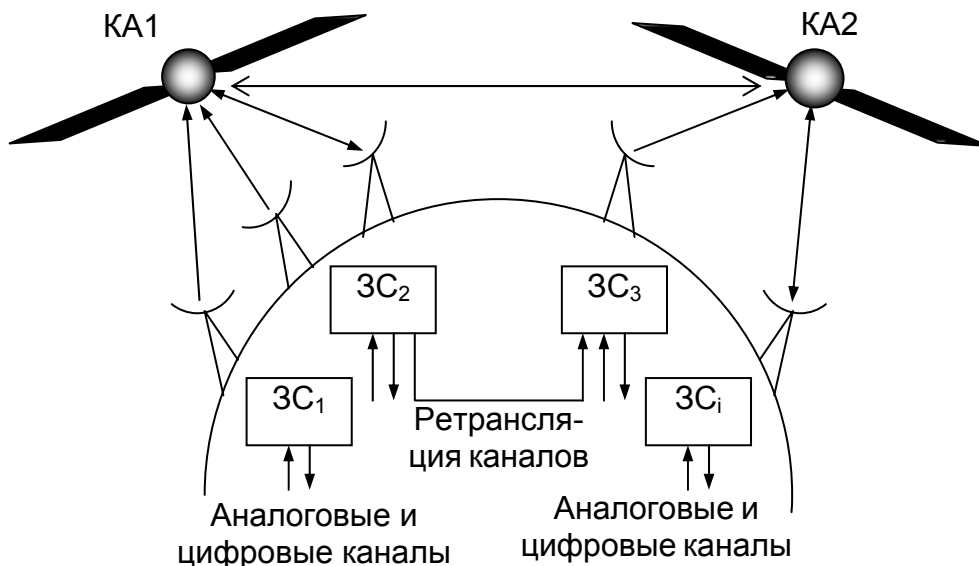


Рис. 1.2

Как видно из рис. 1.2, в ССС осуществляется многократная ретрансляция сигналов земных станций через (с помощью) КА, а сами космические аппараты должны иметь возможность одновременно работать с несколькими земными станциями. КА при этом представляет собой ретранслятор, имеющий, как правило, несколько стволов.

Достоинства средневысотных ССС:

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

Недостатки средневысотных ССС:

- подверженность влиянию пространственных поясов заряженных частиц (пояса Ван Аллена), ухудшающих, а в некоторых случаях и препятствующих организации устойчивой связи. Первый радиационный пояс расположен на высоте 2000...9000 км до 30° в обе стороны от экватора. Второй – на высоте 13000...19000 км до 50° в обе стороны от экватора;
- более низкая чем у геостационарных ССС продолжительность пребывания в зоне радиовидимости земных станций (1,5 – 2 ч).

В *низкоорбитальных ССС* в зависимости от наклона плоскости орбиты относительно экватора различают низкие экваториальные ($\alpha = 0^\circ$), полярные ($\alpha = 90^\circ$) и наклонные ($\alpha \neq 0^\circ$) орбиты. В настоящее время используют низкие наклонные и полярные орбиты высотой 500...1500 км и экваториальные – высотой около 2000 км.

Достоинства низкоорбитальных ССС:

– значительно лучшие энергетические показатели в сравнении с GEO и MEO;

– возможность организации персональной связи при минимальных энергетических затратах потребителя.

Недостатки:

– малая продолжительность сеанса связи с одним КА;

– меньшее время активного существования в сравнении с остальными системами, что вызвано, во-первых, тем, что большая часть времени (до 30%) КА находится на теневой стороне Земли, а, во-вторых, влиянием радиационного пояса;

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

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

Сравнительные показатели геостационарных, среднеорбитальных и низкоорбитальных систем, характеризующие орбитальные различия, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Характеристики	Тип орбиты		
	GEO	MEO	LEO
Высота орбиты, км	36000	10355	700-1500
Количество КА в группировке при непрерывном охвате территории, шт.	3	8-12	48-72
Площадь зоны покрытия одним КА относительно поверхности Земли (угол места – 5^0), %	34	25-28	3-7
Время пребывания КА в зоне радиовидимости, ч	непрерывное	1,5-2	0,15-0,25
Задержка при передаче сигналов, мс – региональная связь – глобальная связь	не менее 500	80-130 250-400	20-70 170-300

Характеристики	Тип орбиты		
	GEO	MEO	LEO
Максимальный относительный доплеровский сдвиг	$\pm 10^{-8}$	$\pm 6 \cdot 10^{-6}$	$\pm (1,8-2,4) \cdot 10^{-5}$
Угол места на краю зоны обслуживания, град	5^0	$25-30^0$	$10-15^0$
Время переключения из одного луча в другой, мин	10-15	5-6	1,5-2

1.2. Состав ССС, характеристики КА и средств вывода на орбиту

Любая ССС имеет в своем составе четыре сегмента: космический, сегмент средств вывода спутников на орбиту, наземный и пользовательский.

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

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

дежности и стоимости. Сравнительные характеристики КА систем мобильной и персональной спутниковой связи приведены в табл. 1.3, а данные о космических платформах – в табл. 1. 4.

Таблица 1.3

Название системы	Тип базовой платформы	Масса КА (на орбите), кг	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Средства вывода КА на орбиту
Геостационарные и высокоэллиптические КА систем мобильной и персональной спутниковой связи					
AceS	A2100	4400 (стартовая)	4000	12	Протон
AMSC	HS601	1500	3600	12	Atlas 2A
Artemis	DRS	2600 (стартовая)	2800	12	H2A
Eutelsat II	Eurostar 2000	900	3000	9	Ariane 44L
Inmarsat- 2 Inmarsat-3	Eurostar 2000	860 1200	1200 1670	10 13	Delta 2, Ariane,Atlas 2A
Italsat F2	-	1983 (стартовая)	1450	8	Ariane 44L
MSAT	HS601	1650	3300	12	Atlas 2A
Optus	HS601	1650	3000	13	Long March CZ-2 E
Solidaridad	HS-601	1672	3150	12-14	Ariane 44LP
Spaceway	HS-702	4000 (стартовая)	н/д	15	н/д
Банкир	Купон	2200	1200	10	Протон
Горизонт	н/д	2100 (стартовая)	1300	3-5	Протон
Марафон	Аркос Маяк	2400 2700	н/д	8-10 5-7	Протон
Полярная звезда	Ямал-200	2100	2500	10	Протон

Название системы	Тип базовой платформы	Масса КА (на орбите), кг	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Средства вывода КА на орбиту
Низкоорбитальные и средневысотные КА систем радиотелефонной и широкополосной связи					
Celestri	Matra Marconi	3100 (стартовая) 2500	13600 (пик) 4600 (сред)	8	н/д
Ellipse	-	730/680*	1780/1880*	5	н/д
Globalstar	-	450	1100	7,5	Delta 2, "Зенит-2"
ICO	HS-601	2750	8700	12	Delta 2, Ariane 4
Iridium	Lockheed	690	1400	5	Delta-2, "Протон" Long March 2C
Odyssey	-	2500	4600	15	Atlas 2A
Skybridge	-	800	3000	8	Ariane 4, Ariane 5
Teledesic	-	795	11600	10	Delta 3
Сигнал	-	310	100**	6	Циклон
Низкоорбитальные системы передачи коротких пакетов данных					
Гонец	-	250	500	7	Рокот
Orbcomm	Microstar	43	160	4	Pegasus XL
Faisat	-	89,5	60	5 – 7	Космос-3

Таблица 1.4

Тип платформы	Масса, кг	Габаритные размеры КА, м	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Цена, млн дол.
A2100	450 (полезная)	d=1,82 h=1, 27-2,1	4000	15	150
Amos	961 (110 полезная)	2,5x1,5x1,5	8 стволов по 20 - 40	10	140
FS-1300	3625 (стартовая) 2200 (на орбите)	н/д	3900	15	80 –100
F-Sat	1134-2948 (полезная)	46,4 м ² (панель)	2400 (глубина разряда - 30%)	7	30
HS-376	650 (на орбите)	d=2,16 h=2,74	1000	10	60
HS-601	2500 (стартовая) 680 (полезная)	20 м (панель)	3000	10	90 –100
HS-702	910 (полезная)		11 000		90 –100
LM700	227 (pallet)	1,65×0,66× ×0,46	5000	7	5
Satcom 3000	1250 (стартовая) 600 (полезная)	1,6x1,3x0,99 14,33 (панель)	н/д	10 -12	20 – 85
Satcom 4000	1820 (стартовая) 1050 (полезная)	1,7x2,1x1,5 19,3 м (панель)	н/д	н/д	н/д
Satcom 5000	2580 (стартовая) 1540 (полезная)	2,8x2,2x2,35 24,3 (панель)	н/д	н/д	н/д

Тип платформы	Масса, кг	Габаритные размеры КА, м	Мощность СЭП, Вт	Срок службы, лет	Цена, млн дол.
Spacebus 2000	1850 (Ariane) 942 (р/топливо)	22,4 (панель)	3000	7	58
Spacebus 300	2400 (Ariane) 1000 (на орбите)	н/д	3240	8 - 9	100
Spacebus 3000	2415 (стартовая) 260 (полезная) 1546 (р/топливо)	н/д	5000	12	100-200
"Ямал -200"	1300-1600 300 (полезная)	н/д	5100	12 -15	н/д
"Ямал-300"	2500-2700 600 (полезная)	н/д	8500 –10000	12 -15	н/д

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

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

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

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

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

Данные об основных ракетносителях, используемых для вывода КА спутниковых систем связи, приведены в табл. 1. 5.

Таблица 1. 5

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

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

Задачей центральных базовых станций, помимо функций приема и передачи информационных потоков, является решение задач управления сетью связи на региональном уровне. Базовые и узловые станции образуют земную сеть системы связи. Через эти станции осуществляется выход абонентов (пользователей) системы в телефонные сети общего пользования ТФОП или цифровые сети интегрального обслуживания ТФОП. На рис. 1.3 в качестве примера изображена структура российской низкоорбитальной системы "Сигнал", предназначенной для обслуживания абонентов на территории Европы и континентальной части Азии.

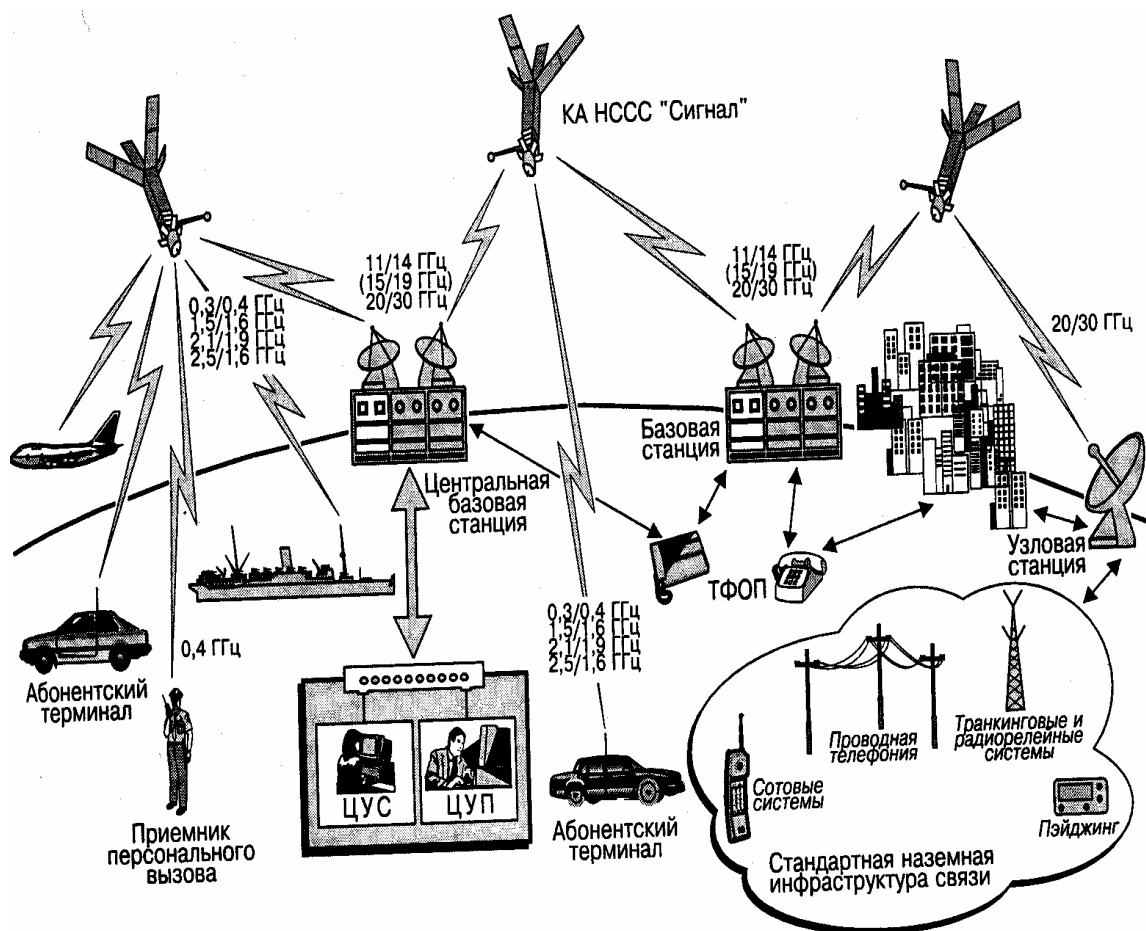


Рис.1.3

Система "Сигнал" не имеет межспутниковых фидерных каналов связи, которыми могут располагать другие системы; связь между любыми абонентскими станциями происходит через КА и наземные базовые станции. Для связи между базовыми станциями и КА предусмотрены специальные магистральные стволы в диапазонах 11/14 (15/19) ГГц и 20/30 ГГц.

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

Пользовательский сегмент включает в себя все виды стационарных и подвижных объектов наземного, морского и воздушного базирования, включая персональных пользователей (рис. 1.3). Абонентские станции (*терминалы*) могут быть стационарными, возимыми и носимыми и их конструктивные особенности зависят от условий эксплуатации. Персональные терминалы современных ССС мало чем отличаются от существующих моделей сотовых телефонов и могут быть двух типов – однорежимные, работающие только в сети данной ССС, и двухрежимные, рассчитанные на обслуживание абонентов как в сети данной спутниковой системы, так и в региональной сети сотовой связи.

1.3. Основные показатели, геометрические соотношения и вероятностные характеристики орбитальных группировок

Период спутника, находящегося на круговой или эллиптической орбите (рис. 1.4) определяется соотношением

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} a^3, \quad (1.1)$$

где: a – большая полуось орбиты (радиус круговой орбиты);
 $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$ – гравитационная постоянная Земли (постоянная Кеплера).

Скорость движения спутника по круговой орбите

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{r}}, \quad (1.2)$$

где r – радиус орбиты.



Рис. 1.4

В общем случае (будем считать, что влияние Солнца, магнитных и гравитационных полей других планет, светового давления и т.п. не очень велико) невозмущенное движение КА подчиняется трём законам Кеплера:

1. Движение ИСЗ происходит по эллипсу, один из фокусов которого расположен в центре Земли, а второй – на таком же расстоянии от апогея орбиты ИСЗ, на котором центр Земли находится от её перигея.

2. Радиус-вектор спутника, т.е. отрезок прямой, соединяющей спутник с центром Земли, в равные промежутки времени описывает равные площади.

1. Отношение квадратов периодов обращения спутников равно отношению кубов их средних расстояний от центра Земли, т.е. кубов больших полуосей орбит.

Положение орбит спутника в геоцентрической системе координат определяют шестью независимыми координатами: величиной большой полуоси эллипса орбиты – a ; эксцентриситетом – e ; долготой восходящего узла – Ω ; наклоном орбиты – i ; временем прохождения спутником какой-то фиксированной точки орбиты – t_0 ; угловым расстоянием перигея – ω .

Ось X направлена из центра Земли до пересечения Гринвичского меридиана с экватором, ось Y – в точку с координатами 0^0 с.ш. 90^0 в.д., ось Z – вдоль оси вращения Земли.

Угол i (угол наклона орбиты) отсчитывают между перпендикуляром, лежащим в плоскости орбиты, и осью Z , с положительным направлением в ту сторону, откуда движение спутника наблюдается против часовой стрелки. Этот угол может меняться от 0^0 до 180^0 . Восходящий узел – это точка перехода КА из южного полушария в северное. Угол Ω отсчитывают от оси X до прямой, соединяющей начало координат с восходящим узлом, угол ω (угловое расстояние) – от большой полуоси орбиты до линии, соединяющей восходящий узел с началом координат.

Обозначим высоту орбиты в точке перигея h_n , а в точке апогея h_a . Тогда величина большой полуоси орбиты и эксцентриситет могут быть описаны следующими выражениями:

$$a = R_0 + \frac{1}{2}(h_a + h_n), \quad (1.3)$$

$$e = (h_a - h_n) / (2R_0 + h_a + h_n), \quad (1.4)$$

где R_0 – радиус Земли.

Фокусы эллипса отстоят от его центра на величину ae . Точка пересечения с поверхностью Земли радиуса-вектора, проведенного в данную точку орбиты из центра Земли, называется *подспутниковой точкой*. Из этой точки КА виден точно в зените, т.е. ось луча антенны ЗС при наведении ее на спутник должна быть перпендикулярна поверхности Земли. В любой другой точке земной поверхности положение луча антенны ЗС отличается от зенита и характеризуется двумя углами – *азимутом* и *углом места*. Координаты подспутниковой точки (широта и долгота) определяются как

$$\varphi_{шс} = \arcsin\{\sin i \cdot \sin[\omega + v(t - t_0)]\}, \quad (1.5)$$

$$\theta_{дс} = \Omega_0 + \frac{2\pi}{T_{зв}}(t - t_0) + \arctg\{\cos i \cdot \operatorname{tg}[\omega + v(t - t_0)]\}, \quad (1.6)$$

где $\varphi_{шс}$ – широта подспутниковой точки; $\theta_{дс}$ – долгота подспутниковой точки; Ω_0 – долгота восходящего узла в момент времени t_0 , т.е. в момент прохождения перигея; $T_{зв}$ – длительность звездных суток (си-

дирических суток), равная интервалу времени, за который Земля совершает один оборот вокруг своей оси относительно звезд ($T_{зв} = 23 \text{ ч } 56 \text{ мин } 04 \text{ с}$). По существу $\varphi_{шс}$ характеризует угол между радиусом, проведенным из центра Земли в подспутниковую точку, и плоскостью экватора, а $\theta_{дс}$ – угол между плоскостью Гринвичского меридиана и плоскостью меридиана, проходящего через подспутниковую точку.

Если считать, что КА находится на экваториальной геостационарной орбите, а период его обращения точно равен звездным суткам $T = T_{зв}$, то азимут и угол места ЗС можно определить из выражений

$$A = \frac{\sin(\varphi_{пс} - \varphi_{шс})}{\sin \theta_{пс} \cos(\varphi_{пс} - \varphi_{шс})} + \frac{\kappa\pi}{2}, \quad (1.7)$$

$$\gamma = \frac{H \cos \theta_{пс} \cos(\varphi_{пс} - \varphi_{шс})}{\sqrt{H^2 + R_0^2 - 2HR \cos \theta_{пс} \cos(\varphi_{пс} - \varphi_{шс})}}, \quad (1.8)$$

где $\theta_{пс}$ – долгота подспутниковой точки спутника в относительной геоцентрической системе координат, $H = 42170 \text{ км}$ – высота орбиты относительно центра Земли.

Необходимо отметить, что период обращения КА обычно выбирают из условия $T = T_{зв}/N$, где N – число оборотов КА вокруг Земли за сутки. При таком выборе T спутник появляется над одними и теми же районами Земли в одно и то же время.

Каждая земная станция имеет так называемую *зону радиовидимости*, которой называют часть земной поверхности, откуда спутник виден под углами к горизонту от δ_{\min} до δ_{\max} , т.е. минимального *угла возвышения* антенны, начиная с которого земная станция принимает сигналы спутника (угла между направлением на КА и плоскостью, касательной к поверхности Земли) и максимального угла, при котором связь пропадает.

Для границы зоны видимости можно записать в каждый момент времени следующие соотношения:

$$R_{\max}^2 = r^2 + R_0^2 - 2R_0r \cos \alpha, \quad (1.9)$$

Здесь φ_0 – угловое расстояние от подспутниковой точки до границы зоны радиовидимости от центра Земли. $R_{\max} = R_0 \sin \varphi_0 / \sin \alpha = r \frac{\sin \varphi_0}{\cos \delta_{\min}}$.

Границу радиовидимости определяют следующим образом. Задают момент времени, параметры орбиты, координаты подспутниковой точки, значение радиуса-вектора спутника и минимальное восхождение, а затем рассчитывают углы

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= R_0 \cos \delta_{\min} / r; \\ \varphi_0 &= 90^\circ - \delta_{\min} - \arcsin(R_0 \cos \delta_{\min} / r). \end{aligned} \quad (1.10)$$

Географические координаты границы зоны радиовидимости $\varphi_{\text{шн}}$ и $\theta_{\text{дм}}$ связаны соотношением

$$\cos \varphi_0 = \sin \varphi_{\text{шс}} \sin \varphi_{\text{шн}} + \cos \varphi_{\text{шс}} \cos \varphi_{\text{шн}} \cos(\theta_{\text{дс}} - \theta_{\text{дм}}), \quad (1.11)$$

т.е., задавая $\varphi_{\text{шн}}$ в пределах $\varphi_{\text{шс}} \pm \varphi_0$, находят $\theta_{\text{дм}}$.

Надежность обслуживания абонентов зависит от таких параметров ССС, как **связность и кратность покрытия**. Под **связностью** понимают возможность соединения абонентов, расположенных в одной или разных зонах обслуживания. Связность обеспечивается при наличии между абонентами непрерывного или квазинепрерывного канала связи. Непрерывная связность обеспечивается, если в зоне радиовидимости обоих абонентов находится, как минимум, один КА.

Кратность покрытия n – это нахождение нескольких КА одновременно в зоне радиовидимости абонентов. Для расчета числа КА, обеспечивающих глобальное покрытие земной поверхности, можно записать следующее выражение:

$$N = \frac{4\sqrt{3}}{9} \left(\frac{\pi}{\varphi_0} \right)^2 = q \cdot p, \quad (1.12)$$

где $q = \frac{2\pi}{\sqrt{3} \cdot \varphi_0}$ – количество КА в одной плоскости;

$p = \frac{2\pi}{3\varphi_0}$ – число орбитальных плоскостей.

На рис. 1.5 изображены графики зависимости числа КА от высоты орбиты для обеспечения связности в ССС при $n = 1$ и $n = 2$, откуда видно, что для однократного покрытия в системах LEO необходимо 40 – 70 спутников, в МЕО – 7 – 12 спутников, в ГЕО – 3 – 4 спутника.

Многokратная связность обеспечивается, если в зоне радиовидимости абонентов находится несколько КА в течение заданного времени.

Вероятность одновременного нахождения в зоне радиовидимости n спутников можно определить из уравнения

$$p = 1 - \left(1 - \frac{\Delta T}{T} \right)^n, \quad (1.13)$$

где $\Delta T/T$ – доля периода, в течение которой КА в среднем находится в зоне радиовидимости земной станции.

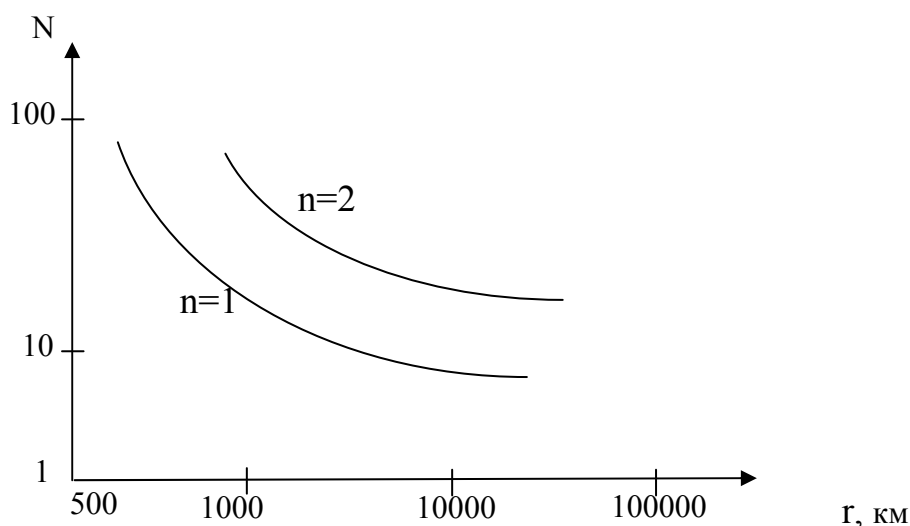


Рис.1.5

Время пребывания КА в зоне радиовидимости зависит от параметров орбиты и угла места ЗС. Чем выше орбита, тем больше время пребывания КА в пределах прямой видимости земной станции. Строгий расчет вероятностных показателей для "всех случаев жизни" довольно сложен, обычно его выполняют путем математического моделирования, как правило, на ЭВМ. Можно получить приближенные расчетные соотношения и для частных случаев. Так, например, среднее время пребывания КА в зоне прямой видимости ЗС для экваториальных орбит определяется выражением

$$\Delta T = \frac{\varphi_0}{180} \cdot \frac{1440 \cdot T}{1440 - T} \quad (1.14)$$

Из выражения (1.14) видно, что для одиночного КА на низких экваториальных орбитах, где период обращения может изменяться от 90 до 127 мин в зависимости от высоты орбиты, максимальная продолжительность сеанса связи на экваторе соответственно составляет от 9 до 31 мин при изменении высоты от 270 км до 2000 км. Для полярных орбит продолжительность связи на широтах $50^\circ - 60^\circ$ составляет от 8 до 15 мин при изменении высоты орбиты от 800 до 1500 км.

Кроме параметра "продолжительность связи" важными показателями также для ССС являются среднее время ожидания, продолжительность перерывов в обслуживании и время доставки.

Строго говоря, эти параметры взаимосвязаны, определяются рядом показателей, например, высотой орбиты (временем передачи сообщения на спутник), методом доступа, временем, затраченным на процедуру вхождения в связь, количеством попыток вхождения в

связь, временем задержки в бортовом ретрансляторе, временем передачи сообщения на Землю, временем задержки в наземных соединительных линиях. В том случае, когда оба абонента находятся в пределах видимости КА (региональная связь), задержка невелика и в основном определяется сетевыми протоколами обмена, методом доступа и коммутационным оборудованием. Наименьшую задержку можно обеспечить в случае использования “прозрачного” ретранслятора и МДКР. При переносе сообщений на борту в глобальной зоне время доставки зависит от взаимного расположения абонентов и может составлять несколько часов.

В табл. 1.6 приведены данные для некоторых систем спутниковой радиотелефонной связи низкоорбитальных (Irridium, Globalstar), среднеорбитальных (Odyssey, ISO) и гестационарной (Triton) ССС.

Таблица 1.6

Характеристики	Наименование систем				
	Irridium	Globalstar	Odyssey	ISO	Triton
Тип орбиты	LEO	LEO	MEO	MEO	GEO
Ширина луча, град	8,2	20,5	6,5	4,5	1,5
Диаметр мгновенной зоны парциального луча, км	600	1642	1192	813	942
Время радиовидимости КА, мин	9	10-12	-	-	Постоянно
Время радиовидимости КА в одном луче, мин	1,5	2	-	-	Постоянно
Задержка при одном скачке (местная связь), мс	240	120	190	240	400
Глобальная задержка (международная связь), мс	410	250	380	480	600

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ССС

2.1. Основные энергетические уравнения спутниковых радиолиний

Линия спутниковой связи состоит из двух участков – Земля-КА и КА-Земля. Каждый из участков (рис. 2.1) содержит передающее и приемное устройство, антенные системы с соответствующими антенно-фидерными трактами (АФТ) и, наконец, канал связи, образованный участком пространства между земной станцией (ЗС) и космическим аппаратом.



Рис. 2.1

Энергетические параметры каждого из участков зависят от ряда факторов. Это прежде всего потери, связанные с распространением радиоволн в пространстве, потери в волноводных трактах приема и передачи, потери, связанные с поглощением атмосферы, потери от фарадеевского вращения плоскости поляризации, рефракции, деполаризации и т.д. Полный учет всех потерь представляется достаточно сложной задачей, поэтому рассмотрим лишь основные факторы, влияющие в наибольшей степени на энергетику систем.

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

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

$$P_{ЭК} = P_{пер} \cdot \eta_{пер} \cdot G_{пер}, \quad (2.1)$$

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

$$Q = \frac{G}{T}, \quad (2.2)$$

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

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

$$W = \frac{P_{\text{ЭК}}}{4\pi d^2} = \frac{P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} G_{\text{пер}}}{4\pi d^2}, \quad (2.3)$$

а напряженность поля на том же расстоянии будет иметь вид

$$E = \sqrt{30 P_{\text{ЭК}} / d} = \sqrt{120 \pi W}. \quad (2.4)$$

Отметим, что выражение (2.4) получено с учетом того, что модуль вектора Пойтинга $\Pi_0 = E_0 H_0$, Вт/м², и для плоской волны справедливо равенство $H_0 = E_0 / \rho_0 = E_0 / 120\pi$, поскольку волновое сопротивление свободного пространства $\rho_0 = \sqrt{\mu_0 / \xi_0} = 120\pi$, так как $\xi_0 = 10^{-9} / 36\pi$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

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

$$P_{\text{пр}} = W \eta_{\text{пр}} S_{\text{эф}} = \frac{P_{\text{ЭК}} \eta_{\text{пр}} S_{\text{эф}}}{4\pi d^2} = \frac{P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} S_{\text{эф}} G_{\text{пер}}}{4\pi d^2}. \quad (2.5)$$

Эффективная площадь апертуры связана с коэффициентом усиления антенны следующим выражением:

$$G_{\text{пр}} = \frac{4\pi S_{\text{эф}}}{\lambda^2}, \quad (2.6)$$

т.е. из выражения (2.6) получаем

$$S_{\text{эф}} = \frac{G_{\text{пр}} \lambda^2}{4\pi}. \quad (2.7)$$

Подставив уравнение (2.7) в соотношение (2.5), запишем

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}}}{(4\pi d / \lambda)^2} = \frac{P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}}}{L_{\text{св}}}. \quad (2.8)$$

В выражении (2.8) числитель характеризует аппаратные параметры линии, а знаменатель – потери в свободном пространстве. В теории радиолокации уравнение (2.8) называют основным уравнением радиолокации, устанавливающим связь между мощностями приема и передачи сигналов в свободном пространстве. В этом уравнении не учтено влияние шумов и оно является лишь отражением так называемых основных потерь $L_{\text{св}} = (4\pi d / \lambda)^2$. Очевидно, что кроме них су-

ществует и ряд дополнительных потерь, упомянутых ранее. Суммарные потери могут быть учтены, если в знаменатель выражения (2.8) вместо $L_0 = (4\pi d/\lambda)^2$ подставить множитель

$$L_{\Sigma} = L_0 \cdot L_{\text{доп}}, \quad (2.9)$$

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

Соответственно, воспользовавшись уравнением (2.8), определим мощность передатчика участка линии связи ССС

$$P_{\text{пер}} = \frac{16\pi^2 R^2 P_{\text{пр}} L_{\text{доп}}}{\lambda^2 \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}}}, \quad (2.10)$$

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

Если вместо мощности сигнала задано соотношение сигнал/шум на входе приемника $(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$, то вместо $P_{\text{пр}}$ в формулу (2.10) необходимо подставить выражение $P_{\text{ш}}(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$, где $P_{\text{ш}}$ – полная мощность шума на входе приемника. С учетом этого, а также того, что суммарная мощность аддитивных шумов, связанных в основном с тепловыми процессами, может быть аппроксимирована как

$$P_{\text{ш}} = kT_{\Sigma} \Delta f_{\text{ш}}, \quad (2.11)$$

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

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

Для участка Земля-КА

$$P_{\text{пер.З}} = \frac{16\pi^2 R_1^2 L_{1\text{доп}} P_{\text{ш.Б}}}{\lambda_1^2 G_{\text{пер.З}} G_{\text{пр.Б}} \eta_{\text{пер.З}} \eta_{\text{пр.Б}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.Б}}. \quad (2.12)$$

Для участка КА-Земля:

$$P_{\text{пер.Б}} = \frac{16\pi^2 R_2^2 L_{2\text{доп}} P_{\text{ш.З}}}{\lambda_2^2 G_{\text{пер.Б}} G_{\text{пр.З}} \eta_{\text{пер.Б}} \eta_{\text{пр.З}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.З}}. \quad (2.13)$$

Общее уравнение всей линии связи, состоящей из двух участков, будет зависеть от связи между суммарным отношением сигнал/шум

на всей линии связи $\left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\Sigma}$ и отношениями $\left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{ВХ.Б}}$, $\left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{ВХ.З}}$. Если

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

$$\begin{aligned} \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{ВХ.Б}} &> \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\Sigma}, & \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{ВХ.Б}} &= a \cdot \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\Sigma}, \\ \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{ВХ.З}} &> \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\Sigma}, & \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{ВХ.З}} &= b \cdot \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\Sigma}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

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

$$\left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)^{-1} = \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{ВХ.Б}}^{-1} + \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\text{ВХ.З}}^{-1}, \quad (2.15)$$

то, решив совместно уравнения (2.14) и (2.15), получим

$$a = \frac{b}{b-1}. \quad (2.16)$$

С учетом выражений (2.11) и (2.14) запишем окончательные энергетические уравнения линии связи

$$\begin{aligned} P_{\text{пер.З}} &= \frac{16\pi^2 R_1^2 L_{1\text{доп}} kT_{\Sigma\text{Б}} \Delta f_{\text{шЗ}}}{\lambda_1^2 G_{\text{пер.З}} G_{\text{пр.Б}} \eta_{\text{пер.З}} \eta_{\text{пр.Б}}} a \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\Sigma}; \\ P_{\text{пер.Б}} &= \frac{16\pi^2 R_2^2 L_{2\text{доп}} kT_{\Sigma\text{З}} \Delta f_{\text{шБ}}}{\lambda_2^2 G_{\text{пер.Б}} G_{\text{пр.З}} \eta_{\text{пер.Б}} \eta_{\text{пр.З}}} b \left(\frac{P_C}{P_{\text{ш}}}\right)_{\Sigma}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

В уравнения (2.17) входят все основные параметры бортовой и наземной аппаратуры, а также наклонные дальности R_1 и R_2 , которые при многостанционном приеме (в данном случае двухстанционном) различны. Кроме того, фигурирующие в выражении (2.17) коэффициенты запаса в общем случае выбирают произвольно, но с учетом их связи в выражении (2.16). Понятно, что при этом должен быть разумный компромисс между мощностями земного и бортового передатчиков и основную нагрузку по запасу мощности должен брать на себя земной комплекс, поскольку увеличение b приведет к неоправданно большим энергетическим и экономическим затратам бортовых систем ретранслятора. На практике коэффициент b выбирают в пределах $b = 1,1 \dots 1,3$. В этом случае коэффициент запаса земной станции $a = 11 \dots 4,3$. Величины $\eta_{\text{пер.Б}}$, $\eta_{\text{пер.З}}$, $\eta_{\text{пр.Б}}$, $\eta_{\text{пр.З}}$ зависят от конструктивно-технологических характеристик АФТ и обычно лежат в таких пределах:

$$\eta_{\text{пер.Б}} = 0,65 \dots 0,9; \quad \eta_{\text{пр.Б}} = 0,65 \dots 0,8;$$

$$\eta_{\text{пер.з}} = 0,5 \dots 0,65;$$

$$\eta_{\text{пр.з}} = 0,8 \dots 0,95.$$

2.2. Краткая характеристика факторов, влияющих на энергетику ССС

Поглощение энергии сигналов в атмосфере. Распространение радиоволн сигналов на трассах ССС связано с потерями энергии на поглощение в ионосфере и тропосфере, причем в диапазоне частот выше 500 МГц наиболее существенными являются тропосферные потери, вызванные так называемыми «глазами тропосферы» – кислородом и водяными парами, а также гидрометеорами и дождями. В соответствии с рекомендациями МККР в условиях «ясного неба» величину ослабления L_a в газах, выраженную в дБ, определяют как

$$L_{a0} = \begin{cases} \frac{(\gamma_{O_2} h_{O_2} + \gamma_{H_2O} h_{H_2O})}{\sin \varphi_0}, & \text{при } \varphi_0 > 10, \end{cases} \quad (2.18)$$

где φ – угол места земной станции, град.;

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

Эти величины могут быть рассчитаны следующим образом:

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

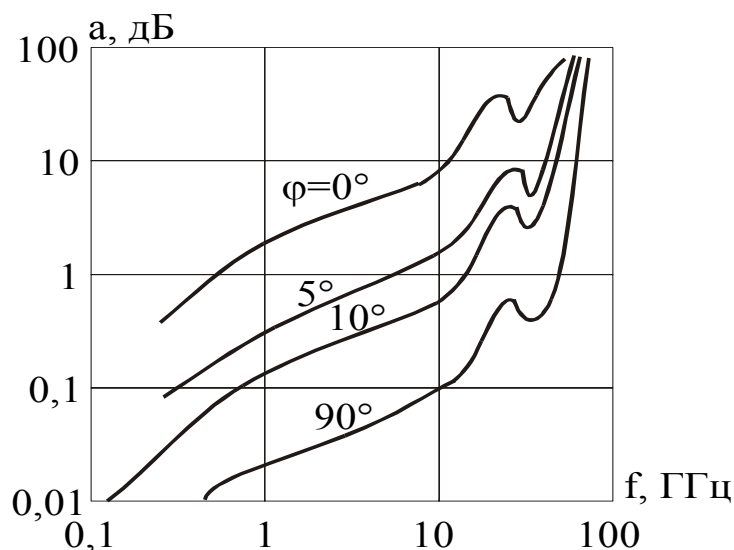
$$h_{H_2O} = 2,2 + \frac{3}{3 + (f - 22,3)^2} + \frac{0,3}{1 + (f - 118,7)^2} \text{ при } f < 350 \text{ ГГц.}$$

На практике с достаточной степенью точности можно считать, что $h_{O_2} \approx 6$, $h_{H_2O} \approx 2,2$.

Частотные зависимости суммарного молекулярного ослабления L_{a0} показаны на рис. 2.2. Видно, что с ростом частоты ослабление сигнала в тропосфере существенно увеличивается и для миллиметровых волн это ослабление может достигать значений более 10 дБ по мощности.

Рис. 2.2

Усредненные значения погонного ослабления в диапазоне частот от 10 до 20 ГГц приведены в табл. 2.1. Необходимо отметить то, что,



если ослабление в кислороде в этом диапазоне практически постоянно и в основном определяется эквивалентной толщиной слоя кислорода h_{O_2} , то поглощение в парах воды зависит от плотности водяного пара ρ , г/м³.

Таблица 2.1

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

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

Если считать, что средние значения эквивалентных толщин слоев кислорода и водяного пара составляют соответственно 6 и 2,2 км, то с учетом данных табл. 2.1 можно рассчитать общее погонное ослабление L_{a_0} , которое, в частности, на частоте 20 ГГц составляет

$$L_{a_0} = 0,02 \cdot 6 + 0,1 \cdot 2,2 = 0,32 \text{ дБ при } \rho = 7,5 \text{ г/м}^3 \text{ и } 0,78 \text{ дБ при } \rho = 20 \text{ г/м}^3.$$

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

Строгая количественная оценка коэффициента ослабления в дожде с учетом всех влияющих факторов затруднена и обычно используют усредненные эмпирические оценки для той или иной климатической зоны с учетом данных многочисленных экспериментальных наблюдений. Поэтому здесь приведем методику расчета ослабления сигнала в дожде, рекомендуемую МККР (отчет 564-2), в соответствии с которой множитель ослабления в дожде, превышающий в 0,01% времени года, определяют как

$$L_D = \gamma_D \cdot d_D \cdot r_{0,01}, \quad (2.20)$$

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

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

$$h_F = 5,1 - 2,151 \cdot \lg \left(1 + 10^{\frac{\varphi - 27}{25}} \right), \quad (2.21)$$

где φ - широта земной станции, град.

Затем определяют высоту дождя, км

$$h_D = \begin{cases} 0,6 \cdot h_F & \text{при } 0^\circ \leq |\varphi| < 20^\circ \\ [0,6 + 0,02 \cdot (|\varphi| - 20)] \cdot h_F & \text{при } 20^\circ \leq |\varphi| < 40^\circ \\ h_F & \text{при } |\varphi| > 40^\circ \end{cases} \quad (2.22)$$

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

$$d_B = \frac{2(h_B - h_0)}{\left[\sin^2 \varphi_0 + 2(h_B - h_0) \right]^{\frac{1}{2}} + \sin \varphi_0}, \quad (2.23)$$

где h_0 – высота станции над уровнем моря.

Функции погонного ослабления γ_D для данной интенсивности I_D , в диапазоне частот 9...30 ГГц могут быть аппроксимированы степенной зависимостью

$$\gamma_D = \beta_D I_D^{\alpha_D}, \quad (2.24)$$

где коэффициенты α_D и β_D являются функциями частоты

$$\begin{aligned} \alpha_D &= 1,47 - 0,09\sqrt{f}; \\ \beta_D &= -10^{-3} + 5,1 \cdot 10^{-5} f^{2,45}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

При этом частота f выражена в ГГц.

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

$$r_{0,01} = \frac{90}{90 + 4d_D \cos \varphi_0}. \quad (2.26)$$

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

Ослабление в тумане зависит от количества жидкой воды в единице объема, т.е. от так называемой *водности* M_T , измеряемой в Г/м^3 . Значение множителя ослабления в тумане зависит также и от значения удельного погонного ослабления k_T , измеряемого в $\text{дБ}\cdot\text{м}^3/\text{Г}\cdot\text{км}$. Таким образом множитель ослабления сигнала в тумане может быть представлен в виде

$$L_T = k_T \cdot M_T \cdot r_T,$$

где r_T – длина пути распространения сигнала в тумане.

Значение множителя удельного погонного ослабления k_T в диапазоне частот 10...20 ГГц при температуре воздуха от минус 8 до минус 20°C лежит в пределах 0,1...0,5 $\text{дБ}\cdot\text{м}^3/\text{Г}\cdot\text{км}$, а при температуре от 0 до 20°C на частоте 12 ГГц этот коэффициент составляет 0,1...0,5 $\text{дБ}\cdot\text{м}^3/\text{Г}\cdot\text{км}$, т.е. с ростом температуры k_T уменьшается.

Водность M_T зависит от оптической видимости и тем больше, чем меньше оптическая (табл. 2.2).

Таблица 2.2

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

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

2.3. Влияние шумов искусственного происхождения на чувствительность приемника

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

$$m_{\text{пвсш}} = k \cdot T_0 \cdot F \cdot \Delta F \cdot q, \quad (2.51,а)$$

либо

$$G_{\text{пвсш}} = \sqrt{k \cdot T_0 \cdot F \cdot \Delta F \cdot q \cdot \rho}, \quad (2.51,б)$$

где: $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ дж/град - постоянная Больцмана;

T_0 - абсолютная температура окружающей среды;

F - коэффициент шума приемника;

ρ - волновое сопротивление фидера;

q - необходимое превышение мощности сигнала над мощностью помехи для осуществления уверенного приема.

Значения q определяются видом модуляции, используемой в линии радиосвязи, и представлено в табл. 2.3.

Таблица 2.3

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

На основании этих данных можно определить коэффициент шума приемника

$$F = \frac{P_{р\grave{н}ь\epsilon'ц'}}{k \cdot T \cdot \Delta F \cdot q} = \frac{E_{р\grave{н}ь\epsilon'ц'}^2}{k \cdot T_0 \cdot \Delta F \cdot \rho \cdot q}. \quad (2.52)$$

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

Однако в реальных условиях работы радиостанции, когда приемник и антенна разделены фидером конечной длины l с потерями β (погонное затухание фидера) коэффициент шума приемника необходимо увеличить из-за увеличения шумовой температуры приемника на активном сопротивлении потерь фидера. В предыдущих разделах эти потери учтены при оценке энергетического потенциала линии.

Дополнительное ухудшение реальной чувствительности приемника связано с влиянием внешних шумов. К ним относятся в диапазоне УКВ прежде всего

- космические шумы;
- шумы искусственного происхождения.

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

$$t_a \cong \frac{1,8 \cdot 10^6}{f_{р\grave{н}ь\epsilon'ц'}^3}, \quad (2.53)$$

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

$$F' = F + t_a. \quad (2.54)$$

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

Следующей по значимости помехой для радиосвязи являются шумы искусственного происхождения. Под ними понимаются шумы от работающего оборудования, не предназначенного для излучения в радиодиапазоне. Эти шумы порождаются преимущественно случайными источниками, такими как шумовые излучения высоковольтных линий, системы автомобильного зажигания, промышленное оборудование (аппараты для дуговой сварки, аппараты для физиотерапии, СВЧ печи и т.п.). В зависимости от типа и размеров города, уровня его промышленности индустриальный шум значительно отличается по интенсивности и степени влияния на чувствительность радиоприемных устройств. По данным работ [1,2] можно рассматривать три типа местности :

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

Влияние в УКВ диапазоне т.е. на частотах свыше 100 МГц влиянием индустриальных шумов в сельской местности на чувствительность радиоприемного устройства радиостанции можно пренебречь, а учитывать это влияние необходимо только в городе и пригородной зоне, причем для оценки этого влияния можно использовать увеличение эффективного коэффициента шума [3]

$$F_{э\text{тм}} = t_a + F(L - 1) + F_{ш} = t_a + F(L - 1) \frac{T_{ш}}{T_0}, \quad (2.55)$$

где: значения $F_{ш}$ находятся по данным рис. 39.

L - потери в кабеле от антенны до входа приемника, равные

$$L = 10^{\frac{\beta l}{10}}, \text{ или } L = \beta \cdot l, \text{ дБ.} \quad (2.56)$$

В (2.56) обозначено: β - погонное затухание дБ/м; l - длина кабеля в м.

При длинных снижениях можно ожидать достаточно больших потерь. Так, при $l = 50$ м и $\beta = 0,1$ дБ/м величина L составляет $L = 3,16$ (5 дБ).

На частоте 165 МГц уровень индустриальных шумов в пригородной зоне может достигать значений 290 дБ (рис. 39). Тогда эффективный коэффициент шума будет равен $F_{\text{эф}} = 1,066 + 2,5 (3,16 - 1) + 100 \cong 106,5$ или 20,3 дБ, что значительно превышает коэффициент шума самого приемника. При этом ухудшение чувствительности составляет 16,3 дБ, т.е. реальная чувствительность приемника будет равна не 0,35 мкВ, а $E_{\text{реальн}} = 2,3$ мкВ.

3. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ РЕТРАНСЛЯТОРОВ ССС

3.1. Требования к бортовым ретрансляторам и их шумовые характеристики

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

Несмотря на большое разнообразие, варианты построения ретрансляторов можно подразделить на несколько групп, отличающихся друг от друга следующими основными признаками (определяемыми в основном принятым построением системы связи через ИЗС):

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

При разработке схемы ретранслятора учитывают, что детектирование колебаний СВЧ или ПЧ и последующая модуляция групповым спектром колебаний СВЧ неизбежно будут приводить к появлению искажений, а, следовательно, к увеличению шумов на выходе канала

связи. Поэтому такие виды преобразования передаваемого сигнала нежелательны.

Схема ретранслятора в значительной степени определяется особенностями существующих электронных приборов. При выборе типа электронных приборов необходимо учитывать диапазон частот, продолжительность службы, размер, массу, надёжность, защищённость от радиации и механических воздействий, потребляемую мощность и рабочие напряжения, КПД, ширину полосы, в которой может быть осуществлена эффективная работа, и некоторые другие параметры.

Условиям работы в схемах ретранслятора удовлетворяют самые разнообразные электронные приборы: полупроводниковые (туннельные диоды, варакторы, транзисторы и др.), клистроны, амплитроны, ЛБВ. Последние преимущественно используют в мощных (оконечных) каскадах БРТ.

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

$$P_{\text{ш}} = P_{\text{шпр}} + P_{\text{шф}} + \eta P_{\text{шА}}, \quad (3.1)$$

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

Эквивалентная шумовая температура приемника связана с коэффициентом шума соотношением

$$T_{\text{пр}} = T_0 (n-1), \quad (3.2)$$

где $n = 5 \dots 20$ – коэффициент шума приемника; $T_0 = 290 \text{ K}$ – реальная температура приемника.

Мощность шумов приемника

$$P_{\text{шпр}} = n k T_0 \Delta f . \quad (3.3)$$

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

$$P_{\text{ш}} = k T_{\Sigma} \Delta f, \quad (3.4)$$

и, соответственно, суммарная эквивалентная шумовая температура

$$T_{\Sigma} = T_{\text{ф}} + T_{\text{пр}} + \eta T_{\text{А}} . \quad (3.5)$$

Эквивалентную температуру Земли обычно принимают равной 290 К, однако уровень шума на входе приемника зависит также и от уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны. В современных антеннах за счет боковых лепестков шумовая температура увеличивается на 10...30 К. Это справедливо и для антенн земных станций. Эквивалентная температура атмосферы зависит от угла места и при $\varphi = 0$ достигает 290 К. При ориентации антенн БРТ на Землю ее шумы будут превалирующими среди шумов других источников. Температура этих шумов составляет величину примерно 290 К. На частотах около 22 ГГц, соответствующих резонансному поглощению водяных паров, наблюдается повышение интенсивности шума.

Плотность излучения Солнца зависит от его активности и на частотах порядка 3 ГГц изменяется от 10^{-20} до 10^{-19} Вт/м² Гц. Плотность излучения Луны на тех же частотах равна примерно $7,6 \cdot 10^{-22}$ Вт/м² Гц. Следует отметить, что величина углового диаметра Солнца составляет (для земного наблюдателя) 32', а диаметр Луны – 33,7'. Поэтому вероятность того, что антенна будет точно ориентирована на Солнце и Луну оказывается весьма малой, в противном случае эквивалентная температура Солнца и Луны повышается до 25000 и 210 К соответственно.

Эквивалентная шумовая температура антенны равна сумме температур космических $T_{\text{кос}}$, атмосферных $T_{\text{атм}}$, омических $T_{\text{Аэ}}$ шумов и шумов Земли T_3 :

$$T_{\text{А}} = T_{\text{кос}} + T_{\text{атм}} + T_3 + T_{\text{Аэ}} . \quad (3.6)$$

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

Очевидно, что величина $T_{\text{я}}$ в данном случае будет равна эквивалентной шумовой температуре Земли, т.е. $T_{\text{я}} = T_3 = 290$ К.

Следовательно, с учётом потерь в фидере, фильтрах и неточности согласования фидеров суммарное значение эквивалентной температуры всех источников шумов, приведенных ко входу, будет зна-

чительно больше 290 К. В качестве примера в табл. 3.1 приведены шумовые характеристики современных малошумящих усилителей (МШУ), работающих в диапазоне частот 1...12 ГГц.

Таблица 3.1

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

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

3.2. Виды бортовых ретрансляторов и структура их построения

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

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

БРТ гетеродинного типа имеют полосу ствола порядка 40 МГц, и основное усиление обеспечивается в тракте промежуточной частоты, которую выбирают в пределах 70...120 МГц. Чаще всего гетеродинные БРТ имеют два преобразования частоты – понижающее,

например, в стволе приема на линии ЗС – КА и повышающее в стволе передачи на линии КА – ЗС.

Пример построения БРТ гетеродинного типа, работающего на одну антенну как на линии вверх, так и на линии вниз, показан на рис. 3.1. По существу эта схема отражает структуру одного комплекта одноствольного ретранслятора первого советского спутника связи "Молния-1", работающего в диапазоне 800...1000 МГц и обеспечивающего два режима: ретрансляцию сигналов одной телевизионной программы при $P_{\text{ввых}} = 40$ Вт, а во втором режиме – дуплексную многоканальную связь при $P_{\text{ввых}} = 14$ Вт. БРТ состоит из трех комплектов, один из которых является рабочим, а два других – резервными, что обеспечивает высокую надежность БРТ в целом.

В ИЗС "Молния-1" прием и передачу осуществляют на одну антенну, причем тракты приема и передачи развязываются между собой с помощью поляризационного селектора и полосовых фильтров $\Phi 1$ и $\Phi 2$. Ствол БРТ содержит два приемника, в которых принятые на частотах $f_{\text{пр1}}$ и $f_{\text{пр2}}$ сигналы преобразуются в сигналы ПЧ, усиливаются УПЧ1 и УПЧ2.

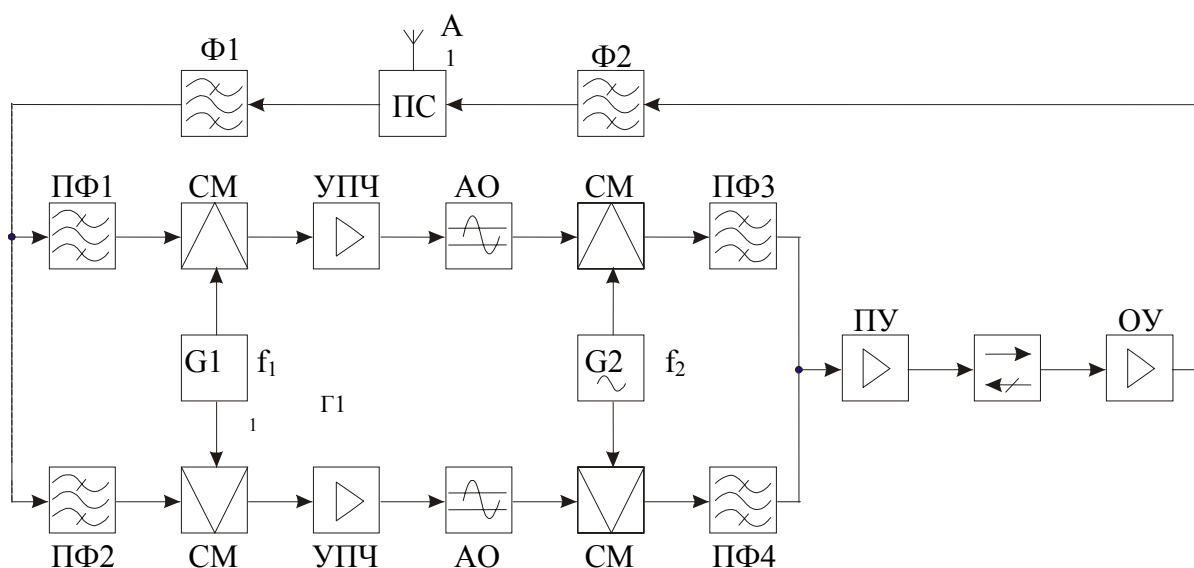


Рис. 5.1

Ограничители АО подавляют паразитную амплитудную модуляцию и стабилизируют уровень сигналов, так как входные сигналы могут изменяться при изменении условий распространения, условий полета КА, ориентации спутника и т.п. Далее с помощью второго гетеродина G_2 происходит повышающее преобразование частоты. Разность частот G_1 и G_2 определяет частоту сдвига. Для ИЗС «Молния-1» эта разность составляет примерно 200 МГц, поскольку

прием осуществляется в диапазоне 800 МГц, а передача – 1000 МГц. В предварительном усилителе (ПУ) сигналы обоих приемников объединяются и усиливаются (в качестве ПУ используется ЛБВ в линейном режиме). Окончательное усиление сигналов происходит в ЛБВ, работающей в режиме насыщения.

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

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

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

В БРТ с однократным преобразованием частоты принимаемый радиосигнал ствола сразу преобразуется в передаваемый сигнал частотой $f_{пер} = f_{пр} \pm F_{сдв}$, где $F_{сдв}$ - частота сдвига (рис. 3.2) и, как видно, в БРТ отсутствует тракт промежуточной частоты, причем здесь осуществляется одно преобразование частоты (сдвиг) вместо двух, как в ретрансляторах гетеродинного типа, и усиление сигналов в каждом стволе происходит на высокой частоте. Частота сдвига $F_{сдв}$ может быть различной в зависимости от используемых данной ССС полос частот. Так, например, в БРТ спутниковых систем "Интелсат-5", "Интелсат-6" частота приема составляет 6 ГГц, частота передачи – 4 ГГц, а частота сдвига соответственно – 2 ГГц. В некоторых ССС частота сдвига может быть порядка 750 МГц.

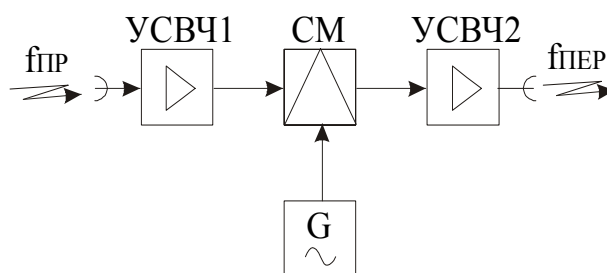


Рис. 3.2

БРТ с демодуляцией сигналов обычно используют тогда, когда необходимо, например, перераспределить различные сигналы линии вверх по соответствующим усилителям и антеннам линии вниз (прием и передача по различным стволам), изменить способ или глубину модуляции на линии вниз по сравнению с линией вверх и, если требуется, сформировать новый групповой сигнал на линии вниз, например, вследствие наличия помехи на линии вверх, искажающей информационное сообщение. Кроме того, операции регенерации сигналов на борту имеют смысл, когда по каким-то причинам стремятся уменьшить количество оборудования ЗС за счет усложнения бортовой аппаратуры.

Упрощенная структурная схема БРТ с демодуляцией сигналов показана на рис. 3.3. Здесь принятый групповой сигнал усиливается малошумящим услителем и преобразуется в сигнал промежуточной частоты, демодулируется и поступает на аппаратуру разделения каналов (АР), позволяющую также выделить на борту сигналы телеуправления (ТУ), которые передаются в участке группового спектра, свободном от основных сигналов.

Сигналы с групповым спектром, занимаемым основными сигналами связи (сигналом телевидения или многоканальным телефонным), от АР поступают на аппаратуру уплотнения (АУ), где происходит сложение этого спектра со спектром телеметрии (ТМ), вводимом на ретрансляторе, где также осуществляются операции переформирования многоканальных сообщений.

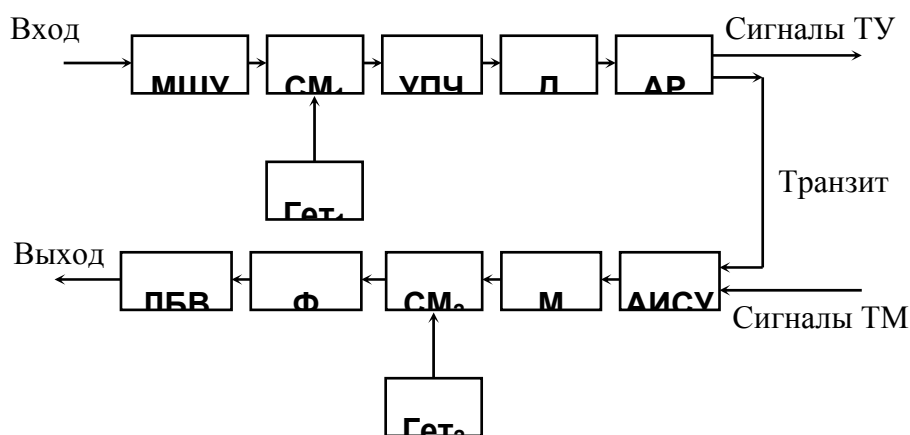


Рис. 3.3

Регенерация цифровых сигналов в БРТ с демодуляцией позволяет получить выигрыш примерно в 3 дБ по сравнению с линейными (без демодуляции) методами их построения. Однако это справедливо

при условии, что отношение сигнал/шум на входах бортового приемника и приемника ЗС примерно одинаковы, т.е. помеховая обстановка как на линии вверх, так и на линии вниз должна быть одинаковой при одинаковых параметрах приемников. На практике отношение сигнал/шум, рассчитываемое на линии вверх, значительно выше соответствующего отношения на линии вниз и получаемый выигрыш оказывается эффективным лишь при наличии на линии вверх мешающих радиосигналов, существенно искажающих структуру ретранслируемых цифровых сигналов. Отметим также и то, что выполнение регенерации сигналов на борту требует значительного усложнения бортовой аппаратуры.

В многоствольных ретрансляторах в целях сокращения бортовой аппаратуры стремятся создать общие блоки усиления для нескольких стволов. Пример схемы бортового оборудования, рассчитанного на передачу пяти стволов, показан на рис. 3.4. Основное усиление в каждом стволе осуществляется сравнительно узкополосным УПЧ на разных промежуточных частотах, а затем, после ограничения и смещения в область СВЧ, все стволы объединяются для последующего усиления с помощью ЛБВ. В УПЧ каждого ствола имеется ограничитель амплитуды и система АРУ.

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

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

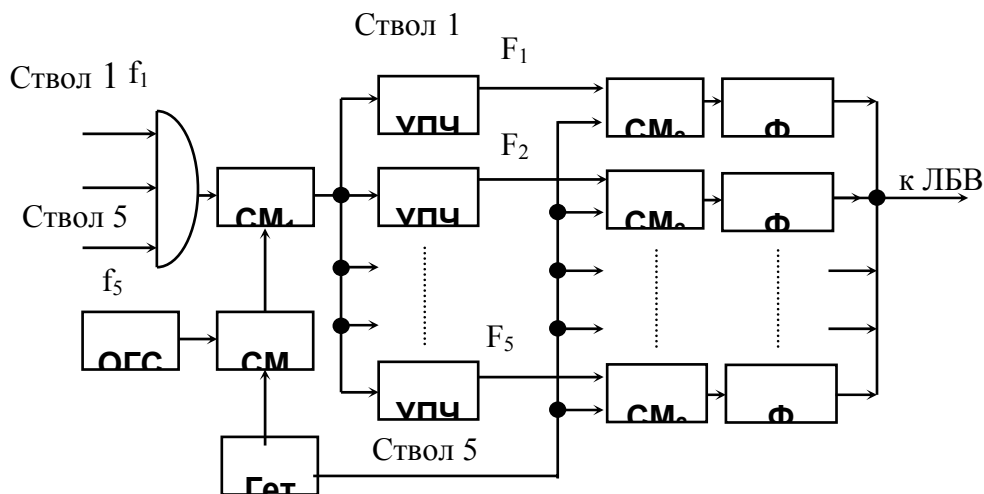


Рис. 3.4

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

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

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ ССС

4.1. Низкоорбитальная система связи Iridium

Система Iridium относится к классу низкоскоростных персональных систем радиотелефонной связи, ее отличительными особенностями являются совместимость с наземными сетями сотовой радиотелефонной связи, предоставление полного набора услуг (наряду с радиотелефонной связью), обеспечиваемых системами класса LEO, возможность круглосуточной связи в любое время суток в режиме реального времени, наличие корректируемой орбитальной группировки, которая обеспечивает глобальное покрытие земной поверхности без мертвых зон в наиболее обжитых районах мира. Система является международной, и для предоставления и реализации её услуг на территории России и стран СНГ создана операторская компания "Иридиум Евразия", ведущим звеном которой выступает ракетно-космическая компания РФ - Государственный космический научно-производственный Центр (ГКНПЦ) им. Хруничева, который не только участвует в проекте как инвестор, но и осуществляет запуски КА Iridium с помощью ракетносителя "Протон".

Система Iridium предоставляет абонентам следующие виды услуг:

- речевую связь со скоростью передачи 2,4 кбит/с. Продолжительность переговоров 30 с (без прерывания связи) обеспечивается с вероятностью 98%. Время установления связи аналогично времени соединения абонентов наземной сотовой связи и не превышает 2 с. Максимальная задержка сигнала при международной связи – 410 мс для 90% вызовов, для местной и зоновой связи – в среднем 240 мс;

- прозрачную передачу данных с переменной длиной сообщения и скоростью передачи 2,4 кбит/с с вероятностью ошибки в радиоканале не хуже 10^{-6} . Предусмотрена также возможность передачи коротких сообщений, определяющих местоположение и статус абонента;

- обмен факсимильными сообщениями со скоростью 2,4 кбит/с;

- персональный вызов как с помощью специальных приемников (пейджеров), так и портативных радиотелефонных терминалов;

- определение местоположения координат пользователей без специальной радионавигационной аппаратуры путем измерения разности между реальным и ожидаемым временем прихода сигналов.

Состав и структура системы. В состав системы Iridium входят пять сегментов: космический, наземный сегмент управления системой; сегмент станций сопряжения, пользовательский сегмент и средства вывода спутников на орбиту. Структура системы Iridium показана на рис. 4.1.

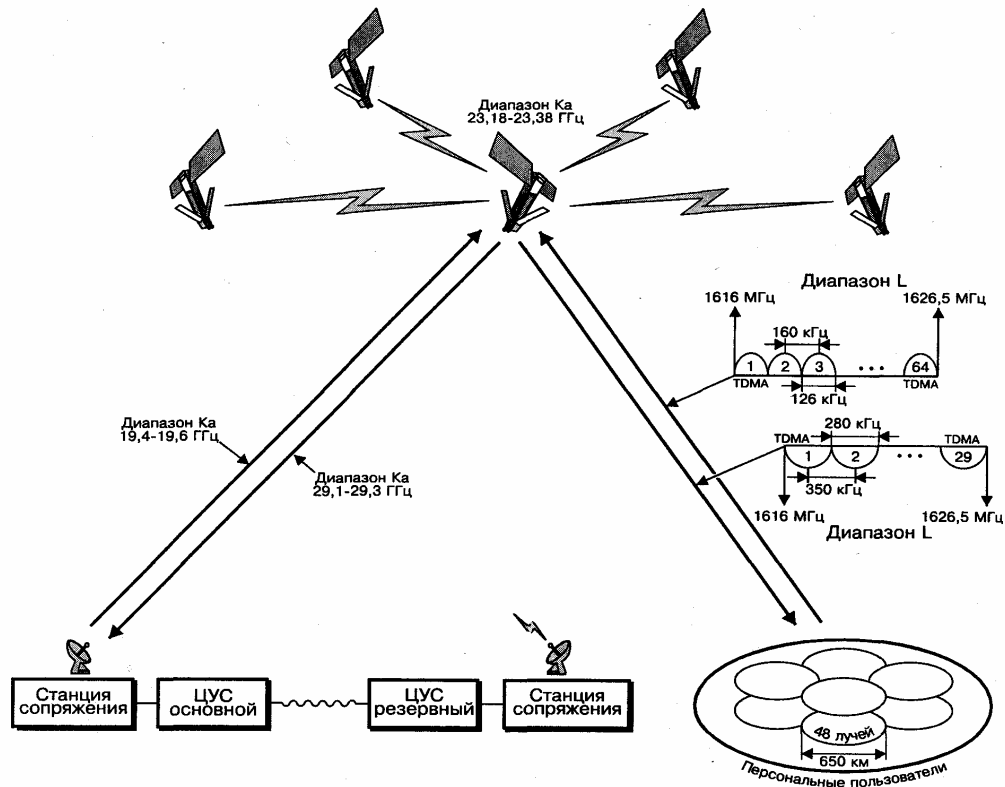


Рис. 4.1

Наземная инфраструктура управления системой включает в себя основной и резервный центры управления, а также земные станции, предназначенные для передачи команд и телеметрической информации. Средства центра управления обеспечивают контроль функционирования каждого КА и всей системы Iridium в целом. Системой управляет два территориально разнесенных центра управления, находящихся на территории США. Основной центр управления (Чендлер, шт. Аризона) выполняет анализ работоспособности элементов системы и контроль за работой всех КА, входящих в орбитальную группировку.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

На КА установлены три группы антенн:

- шесть фазированных антенных решеток, формирующих 48 парциальных лучей на прием и передачу в диапазоне 1616...1626,5 МГц;
- четыре антенны для организации связи со станциями сопряжения в диапазоне 19,4...19,6 ГГц и 29,1...29,3 ГГц;
- четыре волноводно-щелевые антенны для межспутниковой связи в диапазоне 23,18...23,38 ГГц.

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

Вид поляризации: правая круговая в фидерной и абонентской линиях и вертикальная в межспутниковых линиях.

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

В системе применена комбинация частотного и временного методов многостанционного доступа МДЧР/МДВР. Для разделения смежных лучей используют различные частоты (метод МДЧР). В каждой парциальной зоне (cote) формат многостанционного доступа – МДВР. Каждая 8-лучевая структура обеспечивает возможность многократного использования частот.

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

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

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

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

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

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

Для связи с подвижными абонентами в Iridium выделен L-диапазон (1610...1626,5 МГц). Учитывая тот факт, что в полосе частот 1610...1616 МГц работает на первичной основе российская навигационная система "Глонасс" (24 спутника, каждый из которых имеет отдельную несущую с разносом 562,5 кГц), а полоса 1610,5...1613,5 МГц выделена для радиоастрономических служб, то указанные участки спектра для работы Iridium исключены. Исходя из этого, в системе выбран диапазон частот 1616...1626,5 МГц. Однако и в оставшейся части диапазона служба Iridium вынуждена работать на вторичной основе. Это означает, что она не должна создавать помех для служб с первым приоритетом, частоты которым уже присвоены или могут быть присвоены в ближайшее время.

В абонентских станциях применяют антенны типа "четырёхзатухающая спираль" с коэффициентом усиления 1...3 дБ. Антенна обеспечивает прием радиосигналов в секторе углов 360° по азимуту и 10° ... 90° по углу места. Максимальная ЭИИМ абонентской станции – 5,9...8,8 дБВт. Добротность приемника G/T лежит в пределах от -23,8 до -21,8 дБ/К (шумовая температура составляет 553 К). Пороговое отношение сигнал/шум равно 3,1 дБ при вероятности ошибки 10^{-6} .

Основные характеристики абонентских, фидерных и межспутниковых линий приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Характеристики	Тип линии				
	Абонентская		Фидерная		Межспутниковая
Направление связи	Вверх	Вниз	Вверх	Вниз	КА-КА
Диапазон частот, ГГц	1,6160... ...1,6255	1,6160... ..1,625,5	29,1... ...29,3	19,4... ...19,6	23,18... ...23,38
Число каналов	64(9)	29(4)	6	6	8
Скорость передачи, кбит/с	180	400	12500		25000
ЭИИМ, дБВт	8,45	24,5	68	14...27	37,9
G/T, дБ/К	-4,4	-23,8	-1,0	-24,5	5,3 ...7,0

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

На спутнике применены антенны типа АФАР. Коэффициент усиления в максимуме диаграммы направленности составляет 18 дБ в линии "СС-КА" и 21,5 дБ в линии "КА-СС". Шумовая температура приемных устройств фидерной линии равна 1454 К.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для уменьшения влияния быстрого изменения фазы сигнала (за счет вращения или "кувыркания" КА в случае нарушения его стабилизации) применяют метод частотной манипуляции с некогерентной обработкой на приеме.

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

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

- информационный, который предназначен для дуплексной телефонной связи передачи данных и факсимильных сообщений (максимально допустимая вероятность ошибки при сквозной передаче

речи не хуже 10^{-2} , ожидается, что реально достоверность передачи информации будет находиться в пределах $10^{-3} \dots 10^{-4}$);

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

- несколько видов служебных каналов: от абонента к КА, от КА к абоненту.

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

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

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

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

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

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

Глобальная пропускная способность системы Iridium определяется следующим образом. Каждый из 66 КА, используя 48 лучей, формирует на поверхности Земли в каждый момент времени 3168 зон. С учетом того, что одновременно активными могут быть только 70% от числа зон, то общее число активных зон сократится до 2150. Теоретически максимальная пропускная способность составит 172000 дуплексных каналов. Следует отметить, что реальная пропускная способность может оказаться существенно ниже указанной.

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

4.2. Геостационарная система связи " INMARSAT"

В соответствии с международным соглашением основным назначением системы "INMARSAT" является обеспечение безопасности мореплавания и охраны человеческих жизней на море, оповещение о бедствиях, радиоопределение местоположения судов, координация поисково-спасательных работ на море, повышение эффективности плавания судов и организация коммерческой морской связи. По мере развития системы и роста пропускной способности были разработаны различные модификации терминалов и реализованы также услуги воздушной и сухопутной службам. По некоторым оценкам уже в 2000 году число абонентских терминалов системы Inmarsat достигло: 300 тыс. – плавучие объекты, 18 тыс. – самолеты, 180 тыс. – персональные пейджеры, 300 тыс. – сухопутные ПО, персональные терминалы. Количество "сухопутных" терминалов примерно в 1,5 раза превысило число мобильных морских и авиатерминалов.

В состав системы Inmarsat входят (рис. 4.2):

- космический сегмент, состоящий из рабочих и запасных геостационарных КА с ретрансляторами и командно-измерительного комплекса (наземных станций слежения и др.);

- наземный сегмент, включающий в себя береговые земные станции (БЗС), координирующие сетевые станции (КСС) и эксплуатационный контрольный центр (ЭКЦ);
- парк земных станций и терминалов: мобильные (морские суда, самолеты), носимые и стационарные; терминалы используют как для коллективного, так и индивидуального пользования.

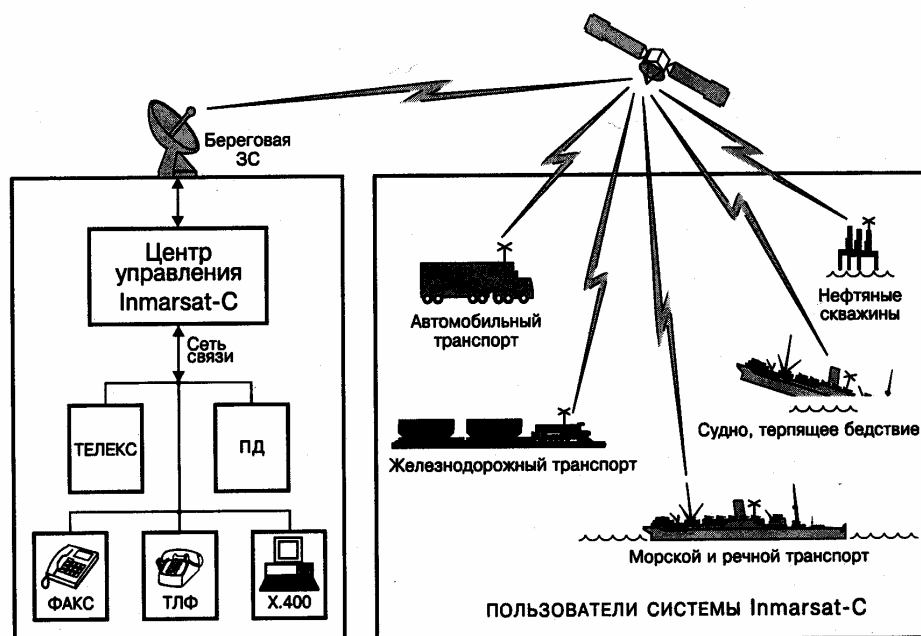


Рис. 4.2

Система работает в диапазонах частот, выделенных для подвижной спутниковой службы. Для связи с подвижными абонентами используется L-диапазон частот: 1626,5...1660,5 МГц (линия "Земля-КА") и 1525,0...1559,0 МГц (линия "КА-Земля"). Работа фидерных линий осуществляется в С-диапазоне: 6425...6450 МГц (линия "Земля-КА ") и 3600...3623 (3600...3630) МГц (линия "КА - Земля").

Контроль работы полномасштабной системы осуществляет ЭКЦ, он обеспечивает прием и обработку информации о состоянии работоспособности всех элементов системы, контролирует характеристики космического сегмента, реализует планы ввода в эксплуатацию новых технических средств.

Береговые земные станции (БЗС) служат промежуточными звеньями между спутниками системы Inmarsat и береговыми абонентами, с которыми они могут соединяться по международным и национальным телефонным и телеграфным сетям. Связь объектов в системе Inmarsat осуществляется только через БЗС. Все береговые

станции системы Inmarsat обеспечивают для судов, терпящих бедствие, возможность быстрого соединения по телефонному или телексному каналу со службами, участвующими в поисково-спасательных работах.

В каждой подспутниковой зоне Inmarsat работают несколько стандартных БЗС, одна из которых выполняет функции координирующей сетевой станции. КСС следит за работой спутниковой сети в данном регионе, распределяет пропускную способность ретранслятора между береговыми станциями. В функции КСС входит передача сообщений абонентам сети на основной (1537,750 МГц) или резервной (1538,475 МГц) вызывных частотах, а также ретрансляция ряда других специальных сообщений.

Космический сегмент системы Inmarsat. На первых этапах создания системы Inmarsat связь была организована через арендуемые у других организаций спутники Marisat, Marecs и Intelsat-5MSC. В настоящее время орбитальная группировка системы Inmarsat состоит из шести КА Inmarsat (четыре КА типа Inmarsat-2 и двух КА типа Inmarsat-3) и семи КА старого поколения (типа Marisat и Intelsat-5MCS).

Подспутниковая зона орбитальной группировки системы Inmarsat охватывает четыре океанических региона: Атлантический восточный (АОР-В), Атлантический западный (АОР-З), Индийский (ИОР) и Тихоокеанский (ТОР). Над каждым из океанических регионов находятся по одному действующему и по два запасных спутника, что обеспечивает покрытие практически всей поверхности земного шара, за исключением приполярных районов. В табл. 4.2 указан состав космического сегмента и точки стояния КА системы Inmarsat.

Таблица 4.2

Океанический регион	АОР-В	АОР-З	ИОР	ТОР
Основные КА	Inmarsat-2F4 (55° з.д.)	Inmarsat-2F2 (15,5° з.д.) Marecs B2 (15,2° з.д.)	Inmarsat-2F1 (64,5° в.д.)	Inmarsat-2F3 (178° в.д.)

В табл. 4.3 приведены данные точек стояния резервных КА системы Inmarsat.

Таблица 4.3

Океанический регион	АОР-В	АОР-3	ИОР	ТОР
Резервные КА	Intelsat MCS-B (50° з.д.)	Intelsat MCS-A (66° в.д.) MarisatF2 (72,5° в.д.)	Intelsat MCS-D (180° в.д.) Marisat F1 (106° з.д.)	Marisat F3 (176,5° в.д.)

Спутники третьего поколения размещены в следующих орбитальных позициях: 64,5° в.д. (Inmarsat-3F1) и 180,5° з.д. (Inmarsat-3F2).

Космические аппараты Inmarsat-2 и Inmarsat-3. Конструкция Inmarsat-2 базируется на стандартной платформе Eurostar со стабилизацией по трем осям. Ретрансляционная аппаратура спутников Inmarsat-2 работает в стандартных для подвижной морской связи диапазонах частот 1,6/1,5 ГГц и 6/4 ГГц.

Ретранслятор выполнен без обработки информации на борту, т.е. осуществляет прием, усиление и перенос сигналов по частоте. Диаграмма направленности антенных систем оптимизирована для облучения поверхности соответствующего региона Земного шара. Стартовая масса спутника составляет 1200 кг, масса на орбите - 860 кг.

Спутники третьего поколения Inmarsat-3 формируют в L-диапазоне один глобальный луч и пять остронаправленных лучей с высокой ЭИИМ (до 46 дБВт), один глобальный луч для GPS / Глонасс и 2 остронаправленных луча в С-диапазоне, что позволяет уменьшить габаритные размеры и значительно снизить требования к ЭИИМ подвижных терминалов. Этот ствол в сочетании с более широкой полосой частот (до 29 МГц) позволил увеличить пропускную способность КА до 1000 телефонных каналов. Основные характеристики КА Inmarsat-2 и Inmarsat-3 приведены в табл. 4.4. Наряду со связным оборудованием на борту КА Inmarsat-3 установлены навигационные приемники GPS/Глонасс сигналов, а также дополнительное оборудование, обеспечивающее ретрансляцию навигационных сигналов, поданных сигналам систем GPS/Глонасс.

Таблица 4.4

Характеристики	Тип спутника	
	Inmarsat-2	Inmarsat-3
Спутниковая платформа	Eurostar	Satcom 4000
Размах панели с солнечными батареями, м	15,23	20
Масса КА, кг	1200	1900
Мощность СЭП, Вт	1200	1670 (общая) 1440(L) + 115(C)
Количество лучей	4 С-диапазона, 1 L-диапазона	1 глобальный L-диапазона; 5 узких L-диапазона; 2 узких С-диапазона; 1 глобальный GPS/Глонасс"
ЭИИМ (L-диапазон)	39	46
Количество эквивалентных телефонных каналов	250 (судно - берег) 150 (берег - судно)	1000
Срок службы, лет	10	13
Стоимость КА, млн. дол.	73	80

Береговые земные станции (БЗС). В настоящее время в системе Inmarsat функционируют 40 береговых станций, расположенных в различных странах мира, в том числе и на территории СНГ (Одесса и Находка). Эти станции обслуживают абонентов в Атлантическом, Индийском и Тихоокеанском регионах. Береговые станции находятся во владении тех стран, на чьей территории они находятся. Их эксплуатируют уполномоченные на это организации национальных администраций.

Алгоритмы работы БЗС и их основные тактико-технические параметры должны находиться в строгом соответствии с требованиями организации Inmarsat. Каждая БЗС имеет закрепленную за ней несущую, которая уплотняется 22 телеграфными каналами. Телефонные каналы не закреплены за конкретными станциями, а находятся в "общем пользовании". Береговые станции имеют выход в национальные и международные сети телефонной и телексной связи.

Все БЗС оснащены оборудованием, поддерживающим связь со

станциями Стандарта Inmarsat-A, однако высокоскоростной режим передачи данных можно реализовать только через некоторые из них. Аналогичная ситуация происходит и с оснащением БЗС оборудованием других стандартов. Так, протоколы Стандарта Inmarsat-C поддерживают около 20 БЗС, причем на территории СНГ таких станций нет. Услуги Стандартов Inmarsat-M и Inmarsat-B реализуют еще меньшим числом БЗС, в основном вновь создаваемыми береговыми станциями.

На БЗС используются параболические антенны диаметром 12...15 м.

Парк абонентских станций. В системе Inmarsat подвижные объекты оснащены разными типами оконечного абонентского оборудования, которое должно удовлетворять специфическим требованиям отдельных категорий пользователей, известным как Стандарты. Наибольшее распространение получили следующие виды стандартов:

- Стандарт Inmarsat-A. ЗС этого стандарта предназначены для работы в сетях телефонной, факсимильной, телексной и телеграфной связи. Станция оснащена параболической антенной диаметром 0,8...1,2 м. Связь устанавливается после набора номера в автоматическом режиме. К настоящему времени выпущена 71 модель станций, разработка новых станций этого стандарта прекращена;

- Стандарт Inmarsat-B. Цифровая ЗС, предлагающая расширение функциональных услуг Стандарта А с одновременным снижением их стоимости. Речь и данные передаются со скоростью 24 кбит/с с использованием модуляции типа QPSK со сдвигом фазы. Размеры антенны те же, что и для станций Стандарта А. В коммерческую эксплуатацию эта подсистема введена в 1994 г. Планируется, что в ближайшие годы ЗС Стандарта В постепенно заменят существующий парк станций Стандарта А. Модели наземных ЗС могут быть размещены в одном-двух чемоданах или же установлены непосредственно на транспортных средствах;

- Стандарт Inmarsat-C. Малогабаритная станция персональной связи с ненаправленной или слабонаправленной антенной, обеспечивающая передачу информации в пакетном режиме. Обмен данными, в том числе короткими сообщениями, происходит со скоростью 600 бит/с. Имеется 12 моделей станций Стандарта С в морском исполнении и 8 моделей для других служб. В настоящее время ни в РФ,

ни в странах СНГ серийное производство станций Стандарта С не освоено;

- Стандарт Inmarsat-M. Малогабаритная станция, обеспечивающая радиотелефонную и факсимильную связь и передачу данных. Информацию передают со скоростью 8 кбит/с (данные), применяя квадратурную фазовую модуляцию типа QPSK. Используют антенну диаметром 40...50 см, а также ФАР для подвижных наземных объектов;

- Стандарт Inmarsat-Mini-M. Малогабаритная станция, предназначенная для радиотелефонной и пейджинговой связи.

Основные характеристики морских и сухопутных терминалов Стандартов А, В, С, М и Mini-M приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.5

Стандарт	А	В	С	М	Mini-M
Год начала эксплуатации	1976	1992	1991	1993	1997
Скорость передачи, кбит/с	до 64	24 (речь) 64 (данные)	0,6	до 8	4,8 (речь) 2,4 (данные)
Модуляция	ЧМ	QPSK	BPSK	QPSK	BPSK,
G/T, дБ/К	-4	-4	-23	-12...-10	н/д
ЭИИМ, дБВт	36	33	14 ± 2	27	11...17
Полоса, кГц	50	20	5	10	10

В системе Inmarsat применяют несколько типов самолетных станций, предназначенных для обеспечения следующих видов услуг:

- Inmarsat-Aero-H – 6-канальная, работающая в режимах: радиотелефонная связь, факс, телекс, высокоскоростная передача данных - для обслуживания экипажей воздушных судов и пассажиров на международных авиалиниях;

- Inmarsat-Aero – 4-канальная, работающая в режимах: радиотелефонная связь, факс, телекс, высокоскоростная передача данных - предназначена для обслуживания экипажей воздушных судов и пассажиров на международных авиалиниях;

- Inmarsat-Aero-L – одноканальная, режим низкоскоростной передачи данных для обеспечения безопасности полетов воздушных судов;

- Inmarsat-Aero-C – одноканальная, режим низкоскоростной передачи данных, удовлетворяющая требованиям Стандарта Inmarsat-C.

Основные параметры терминалов, предназначенных для воздушных судов, приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Стандарт	Аеро-Н	Аеро-І	Аеро-L	Аеро-С
Число каналов (макс)	6	4	1	1
Скорость передачи, кбит/с,	2,4...9,6	2,4...4,8	1,2	0,6
ЭИИМ, дБВт	22,5...25,5	22,5	13	12...14
Добротность G/T, дБ/К	-13	-19	-26	-23

Система INMARSAT-M. Система цифровой спутниковой телефонной связи Inmarsat-M является первой среди подобного класса систем, которая предоставляет возможность установления и ведения речевого обмена без участия оператора связи. Терминал Inmarsat-M находится в личном пользовании абонента.

Система Inmarsat-M обеспечивает двухстороннюю телефонную связь (до 8 кбит/с) и передачу данных или факсимильных сообщений (группа G3) со скоростью 2,4 кбит/с. Основная область применения – предоставление услуг пользователям, удаленным от наземных телефонных сетей общего пользования. Система Inmarsat-M также обеспечивает интерфейс для обмена данных в сетях пакетной коммутации (X.25) и электронной почты (X.400).

Для абонентов Inmarsat-M предоставлены следующие дополнительные виды услуг:

- введение индивидуальных идентификационных номеров для абонентов, коллективно использующих станцию Inmarsat-M;
- автоматическая регистрация длительности занятия канала станции с выводом данных на дисплей или принтер;
- доступ к спутниковому каналу по кредитной карточке и др.

Комплект станции для установки на подвижных объектах содержит приемо-передающий терминал и легкую, разворачиваемую на стоянке антенную решетку, которую наводят на геостационарный спутник.

Протоколы работы системы Inmarsat-M поддерживают около 20 береговых ЗС. Серийное производство станций освоено более чем десятью фирмами в различных регионах мира.

В системе Inmarsat-M возможно установление связи не только с абонентами сетей общего пользования, но также и двух абонентов системы между собой с применением двойной ретрансляции через береговые ЗС.

Для сухопутных пользователей разработаны два базовых варианта исполнения станции Стандарта-M: "кейс- дипломат" и переносной контейнер.

Терминал типа "кейс-дипломат" представляет собой облегченный вариант носимой станции, ориентированной преимущественно для персональных пользователей, совершающих деловые поездки. В кейс-дипломат, кроме собственно антенны, размещаемой в крышке, может дополнительно укладываться миниатюрный факс-аппарат или малогабаритное печатающее устройство.

Контейнерный вариант терминала предназначен для эксплуатации в полевых условиях или для установки на подвижные объекты, включая летательные аппараты. Он имеет значительно большие массу и габаритные размеры, его отличает промышленный дизайн и возможность автономного электропитания. Так, терминал Стандарта-M фирмы NEC имеет массу порядка 16 кг.

Система Inmarsat-C предоставляет пользователям следующие виды услуг:

- автоматический сбор данных с транспортных средств или судов. Центр управления может опрашивать подвижные терминалы периодически (через фиксированные промежутки времени) или же в заранее определенные моменты времени;
- определение местоположения. Передаваемые данные о местоположении могут быть получены от наземных систем Деcca и Loran-C, спутниковых систем GPS/Глонасс и Transit или другого навигационного оборудования, установленного на подвижном объекте;
- координация поисково-спасательных работ. Система обеспечивает передачу заранее запрограммированных сообщений (путем нажатия одной или нескольких кнопок). Записанные в память терминала аварийные сообщения указывают на последнее местоположение подвижного объекта;
- отслеживание угона транспортных средств. В случае угона вмонтированные в транспортное средство датчики посылают аварийный сигнал на терминал, к нему добавляется информация о местоположении, и сообщение излучается в эфир. Принимаемая

информация поступает на станцию наблюдения, связанную с соответствующими службами обеспечения безопасности.

Организация связи в системе INMARSAT-C. Абонентские станции системы Inmarsat-C осуществляют связь с диспетчерскими центрами соответствующих служб через региональные береговые ЗС, выполняющие функции станций сопряжения сети.

Сообщения, полученные из наземных сетей, сначала запоминаются на станции сопряжения, а затем преобразуются из исходного формата (телекс, данные и др.) в удобную для передачи в системе Inmarsat-C форму. На процедуру накопления и передачи уходит обычно несколько минут. Однако приоритетные сообщения типа аварийных обрабатываются в течение нескольких секунд.

Передача данных в радиоканал осуществляется с использованием фазовой манипуляции и помехоустойчивого кодирования (сверточный код $r=1/2$, $k=7$). Метод многостанционного доступа – синхронная Алоха. Длительность кадра – 8,6 с.

Абонентская станция стандарта Inmarsat-C, оборудованная встроенным GPS-приемником, позволяет автоматически передавать данные о местоположении объекта в диспетчерский центр.

Дополнительные виды услуг системы Inmarsat-C. Служба FleetNET. Сеть циркулярной связи, позволяющая передавать сообщения неограниченному числу заранее определенных абонентов. FleetNET предназначена для учета абонентской платы, передачи информационно-справочных данных, организации диспетчерской связи.

Этим перечень услуг не ограничивается. Пользователям предоставляется возможность модифицирования или изменения параметров группового вызова. Данный вызов может быть осуществлен через ТфОП, по телексу, видеотекстовому терминалу или с ПК, имеющего соответствующее программное обеспечение.

Служба SafetyNet. Выделенная сеть для распространения информации о морской безопасности используется гидрографическими, метеорологическими, береговыми службами безопасности и администрациями, координирующими деятельность поисково-спасательных бригад. Она имеет дополнительную возможность автоматического выхода на технические средства района бедствия.

Предоставляемые сетью SafetyNet услуги включают в себя передачу информации об обеспечении безопасности мореплавания, метеосводки и навигационные предупреждения для управления флотом.

Терминал Inmarsat-C. В системе применяют несколько моделей терминалов, отличающихся своими функциональными возможностями и конструктивным исполнением. Дополнительное оборудование, которое содержит навигационные и телеметрические устройства, может входить в состав терминала или подключаться к нему с использованием стандартного интерфейса.

Терминалы Inmarsat-C морского исполнения оснащены специальной аварийной системой, которая генерирует и автоматически посылает сообщения о бедствии, данные о местоположении судна и другие сведения.

Конструктивно терминал состоит из связного модуля и малогабаритной всенаправленной антенны. Основные параметры приемопередатчика: ЭИИМ – 14 ± 2 дБВт (для углов места 5°), добротность $G/T = -23$ дБ/К, модуляция - QPSK.

4.3. Среднеорбитальная спутниковая система связи Odyssey

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

Космический сегмент и зона обслуживания. Зонами обслуживания системы являются территория континентальной части США с прибрежными районами, Европа, Азия и акватория Тихого океана.

Для глобального покрытия Земли использованы средневысотные круговые орбиты. Космический сегмент системы Odyssey состоит из 12 КА, выведенных в орбитальные плоскости высотой 10354 км и наклоном 50° . В каждой плоскости находится по четыре КА. Период обращения каждого из них составляет около шести часов при угловой скорости полета около 1 град/мин. Над большинством регионов суши одновременно в зоне видимости ЗС появляется не менее двух КА, причем хотя бы один из них будет не ниже 30° над горизонтом. Вся система обеспечит обслуживание абонентов на территории Земли между 70° с.ш. и 70° ю.ш. При ширине диаграммы направленности спутника, равной 40° , один КА обеспечит охват зоны диаметром свыше 7 тыс. км

Отличительная особенность системы Odyssey – квазистатичное покрытие поверхности Земли. Каждый спутник имеет многолучевую антенну, создающую непрерывную сотовую структуру покрытия на поверхности Земли. Лучи КА Odyssey направляются только на сушу, а также в наиболее судоходные акватории мирового океана. По мере

движения космических аппаратов по орбите система позиционирования лучей следит за тем, чтобы последние образовывали географически неподвижную сотовую структуру на обслуживаемой территории. Переключение зон обслуживания происходит в том случае, если углы над горизонтом, под которыми наблюдается КА с земных станций, становятся недопустимо малы.

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

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

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

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

Два спутника, одновременно обслуживающих какой-либо из регионов, обеспечивают радиотелефонную цифровую связь с общей емкостью 6 тыс. телефонных каналов. Для стационарных пользователей пропускная способность одного КА составляет более 10 тыс. каналов (режим передачи данных со скоростью 64 кбит). Для связи со

станциями сопряжения на борту КА предусмотрены следящие направленные антенны с карданным подвесом. Работа фидерных линий осуществляется в К-диапазоне. Основные характеристики аппаратуры при работе по фидерной линии приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

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

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

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

Каждый из обслуживаемых регионов имеет по одной станции сопряжения. В глобальной системе предусмотрено семь станций сопряжения. На каждой СС установлено четыре следящие параболические антенны диаметром 7 м. Три антенны используют для одновременной работы со спутниками. Четвертая антенна служит для переретрансляции трафика с одного на другой спутник при условии их одновременного нахождения в зоне радиовидимости СС. Основные характеристики станций сопряжения приведены в табл. 4.8.

Терминалы пользователя. Вследствие острой направленности бортовых антенн и высокой чувствительности приемных устройств спутников Odyssey в абонентских станциях используют передатчики с малой выходной мощностью. Выпускают две модификации абонентских терминалов: с выходной мощностью передатчика персонального

терминала до 0,5 Вт и мобильного до 5 Вт. Коэффициент усиления антенны типа четырехзаходной спирали равен 2,5 дБ. Энергетический запас на линии связи "Земля-КА" составляет 6...10 дБ.

Таблица 4.8

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

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

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

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

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

Координаты абонентского терминала определяют по собственным сигналам системы Odyssey. Относительно большое для средневысотной орбитальной группировки количество спутников позволяет на значительной территории наблюдать созвездие из двух или трех

спутников под большими углами места. Это делает возможным определение местоположения только по сигналам КА Odyssey.

ОГЛАВЛЕНИЕ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	2
ВИДЫ РАДИОСВЯЗИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ	3
1.1. Назначение, виды и орбитальные характеристики ССС	6
1.2. Состав ССС, характеристики КА и средств вывода на орбиту	11
1.3. Основные показатели, геометрические соотношения и вероятностные характеристики орбитальных группировок	18
2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ССС	24
2.1. Основные энергетические уравнения спутниковых радиолиний	24
2.2. Краткая характеристика факторов, влияющих на энергетику ССС	29
2.3. Влияние шумов искусственного происхождения на чувствительность приемника	33
3. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ РЕТРАНСЛЯТОРОВ ССС	37
3.1. Требования к бортовым ретрансляторам и их шумовые характеристики	37
3.2. Виды бортовых ретрансляторов и структура их построения	40
4. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ ССС	46
4.1. Низкоорбитальная система связи Iridium	46
4.2. Геостационарная система связи " INMARSAT"	54
4.3. Среднеорбитальная спутниковая система связи Odyssey	64