



СПРАВОЧНИК ПО СВЯЗИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Издание 2014 года
Бюро радиосвязи



Справочник по связи для космических исследований

Издание 2014 года

Бюро радиосвязи



Вступление

Справочник по связи для космических исследований разработан специалистами Рабочей группы 7В 7-й Исследовательской комиссии по радиосвязи (Научные службы). Первая редакция была подготовлена под руководством председателя Рабочей группы 7В г-на С. Тейлора (Соединенные Штаты Америки). Настоящая (последняя) редакция, подготовленная под руководством председателя Рабочей группы 7В г-на Б. Кауфмана (Соединенные Штаты Америки), содержит информацию о вариантах использования и технологических достижениях в области связи для космических исследований, а также об измененных рекомендациях и отчетах МСЭ-R, выпущенных с момента первой публикации Справочника в 2002 году.

Справочник не является сборником материалов по космическим исследованиям. Он посвящен главным образом тем аспектам деятельности службы космических исследований, которые связаны с управлением использованием радиочастотного спектра в целях минимизации помех между службами радиосвязи в процессе работы службы космических исследований. В четырех главах Справочника читатель знакомится с основными принципами работы службы космических исследований. Справочник охватывает такие области, как функции и техническая реализация систем космических исследований, предпочтительные полосы частот, а также вопросы, относящиеся к совместному использованию радиочастотного спектра с другими службами. В Прилагаемом документе 1 приведен список рекомендаций МСЭ-R, относящихся к теме космических исследований, которые могут служить дополнительным справочным материалом.

Надеюсь, что настоящий Справочник будет полезен для специалистов по управлению использованием спектра и инженеров радиосвязи.

Франсуа Ранси
Директор Бюро радиосвязи

Предисловие

4 октября 1957 года на орбиту Земли был выведен первый объект, созданный руками человека, – "Спутник-1". Это событие стало началом эпохи освоения космоса. Для осуществления связи с космическими аппаратами была создана радиослужба, известная как служба космических исследований. В настоящее время исследовательские космические программы выполняются космическими агентствами и администрациями всего мира. В Регламенте радиосвязи МСЭ (РР) служба космических исследований определяется как "служба радиосвязи, в которой космические корабли или другие объекты в космосе используются для научных или технических исследований".

На Пленарной ассамблее МККР, состоявшейся в 1990 году в Дюссельдорфе, путем структурной реорганизации была создана 7-я Исследовательская комиссия по радиосвязи (Научные службы) (ИК7). Деятельность 7-й Исследовательской комиссии в значительной степени связана с применением последних достижений в использовании радиочастотного спектра для решения научных задач.

В настоящее время 7-я Исследовательская комиссия включает в себя несколько рабочих групп (РГ), которые занимаются техническими вопросами, относящимися к конкретным дисциплинам, под эгидой научных служб. Космические исследования и связанные с ними прикладные задачи входят в сферу компетенции Рабочей группы 7В и включают в себя изучение линий связи, необходимых для функционального обеспечения космических полетов в самые дальние уголки Солнечной системы и даже за ее пределы.

Последние четыре десятилетия были отмечены выдающимися достижениями в многочисленных научных и технических дисциплинах, которые принесли пользу человечеству, расширили наши знания и дали нам более ясное представление о пространстве, в котором мы живем. В число этих достижений входят полеты исследовательских аппаратов в автоматическом режиме к планетам нашей Солнечной системы и за ее пределы, пилотируемые полеты на Луну, создание и эксплуатация космической станции "Мир", а также обеспечение качественной космической связи при помощи спутников для ретрансляции данных. В числе действующих проектов – строительство международной космической станции и планирование пилотируемого полета на Марс.

Постоянная модернизация и технические достижения в области космических исследований привели к расширению существующих и появлению новых требований и видов деятельности, а также к потребности в улучшении функциональных характеристик и повышению надежности систем связи для космических исследований. С появлением новых служб и систем орбитальное пространство и радиочастотный спектр, являющиеся базой для любого вида космической связи, становятся все более и более перегруженными. Для обеспечения совместного использования этих ограниченных ресурсов и удовлетворения запросов сегодняшнего дня и грядущих лет необходимы фундаментальные знания о системах космической радиосвязи и их потребностях.

Разработка рекомендаций была и остается основным направлением деятельности Исследовательской комиссии. Однако при этом очевидно, что эксперты, работающие над этими вопросами в Исследовательской комиссии, могут предоставить значительный объем базовой информации своим коллегам-ученым и непрофессионалам, которые полагаются на данные, полученные в результате космических исследований, для решения основных научных вопросов и расширения общих познаний человечества о космическом пространстве и происхождении Вселенной. В связи с этим было принято решение о подготовке и публикации настоящего Справочника. Благодаря ему пользователи данных стандартов смогут получить более полную информацию о системах связи для космических исследований, которая позволит им более эффективно проектировать и применять эти мощные инструменты.

Задача настоящего Справочника – дать читателю общее представление о службе космических исследований. В Справочнике представлены некоторые базовые сведения, касающиеся технических требований и потребностей в спектре, необходимых для поддержки множества различных программ, полетов и других видов деятельности, связанных с космическими исследованиями. Справочник написан в первую очередь для правительственных чиновников, членов Исследовательских комиссий по радиосвязи и сотрудников организаций, занимающихся вопросами управления использованием спектра. Настоящий Справочник призван также обеспечить информацией вторичную аудиторию, а именно студентов вузов и другие группы населения, которые интересуются некоторыми аспектами службы космических исследований, касающимися радиосвязи.

Как председатель 7-й Исследовательской комиссии я с удовольствием воспользуюсь выпавшей мне честью представить настоящий Справочник сообществу пользователей стандартами космических исследований, которые, я уверен, найдут в нем бесценный справочный материал для своей работы.

Настоящий Справочник было бы невозможно подготовить без вкладов, предоставленных многими администрациями, участвующими в работе 7-й Исследовательской комиссии. Кроме того, выдающуюся роль в подготовке различных разделов Справочника сыграли докладчики, и я хотел бы выразить особую благодарность г-же С. Тейлор (Председатель РГ 7В, Соединенные Штаты Америки), г-ну В. Меенсу (вице-председатель ИК7, Франция), г-ну Р. Якобсену (вице-председатель ИК7, Австралия), г-же С. Кимура (Япония) и г-дам Р. Эндрюсу, Д. Бэткеру и Б. Юнесу (Соединенные Штаты Америки). Нашей особой благодарности также заслуживает г-н А. Налбандян из Бюро радиосвязи, который сыграл ключевую роль в разработке настоящего Справочника.

Р. М. Тейлор
Председатель
7-й Исследовательской
комиссии

Предисловие ко второму изданию

С момента первой публикации Справочника по связи для космических исследований данная отрасль связи претерпела множество изменений. За это время была запущена в эксплуатацию Международная космическая станция, а многие администрации реализуют собственные действующие космические программы. Многочисленные космические агентства принимают все большее участие в исследованиях Луны и Марса в автоматическом режиме, планируя в дальнейшем отправлять людей на Марс для проведения исследовательских работ.

Благодаря новым технологиям, таким как нано- и пикоспутники, проведение научных исследований в космосе существенно упростилось. Подобного рода аппараты обладают более низкой стоимостью и малым весом, что позволяет значительно ослабить ограничения при разработке и запуске спутников.

Потребность в более высокой скорости передачи данных, позволяющей выполнять более сложные полетные программы, пропорциональна росту объема космических исследований. В связи с расширением деятельности и увеличением объема информации, обрабатываемой в ходе выполнения программ, совместное использование спектра стало критически важным аспектом связи для космических исследований. Совместное использование спектра было оптимизировано при помощи ряда методов, в частности применения модуляций более высокого порядка, что повышает эффективность полосы частот, и использования более высоких частот, что улучшает направленность.

Еще одним существенным продвижением в области связи для космических исследований стал растущий интерес и использование спектра в пределах оптического диапазона.

В обновленном Справочнике по-прежнему представлены некоторые базовые сведения, касающиеся технических требований и потребностей в спектре, необходимых для поддержки множества различных программ, полетов и других видов деятельности, связанных с космическими исследованиями. Задачей настоящего Справочника является содействие пониманию некоторых аспектов службы космических исследований, касающихся радиосвязи.

Вклады, представленные многими администрациями, принимающими участие в работе 7-й Исследовательской комиссии, сделали возможным пересмотр настоящего Справочника. При этом ряд специалистов, внесших значительный вклад в работу, заслуживают отдельной благодарности: г-н Б. Кауфман (Председатель РГ 7В, Соединенные Штаты Америки), г-н Е. Вассало (ЕКА), г-н В. С. Гэлбрейт (Соединенные Штаты Америки), г-жа П. Дамит (Соединенные Штаты Америки) и г-да Т. Берман, Дж. Фелдхейк, С. Кайалар, С. Асмар, Ф. Маншади и Т. ВонДик (Соединенные Штаты Америки). Особая благодарность выражается г-ну В. Ноздрину из Бюро радиосвязи за его особо важную роль в разработке настоящего Справочника.

В. Меенс

Председатель
7-й Исследовательской
комиссии

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
ГЛАВА 1. – Введение. Служба космических исследований	1
1.1 Космические исследования. Общий обзор	1
1.2 Характеристики программ космических исследований	2
1.2.1 Длительность программ космических исследований	2
1.2.2 Орбиты программ космических исследований.....	3
1.2.3 Виды программ космических исследований.....	4
1.3 Системы космических исследований	5
1.3.1 Земной сегмент	5
1.3.2 Космический сегмент.....	7
ГЛАВА 2 – Функции связи и слежения для космических исследований и их техническая реализация.....	11
2.1 Функции	11
2.1.1 Передача сигналов управления (команд).....	11
2.1.2 Передача телеметрических данных космического аппарата.....	11
2.1.3 Передача полетных телеметрических данных.....	11
2.1.4 Слежение.....	11
2.1.5 Научные исследования с помощью радиосвязи	12
2.2 Техническая реализация	12
2.2.1 Надежность, требования к коэффициенту ошибок по битам и энергетический запас линии.....	12
2.2.2 Требования к скорости передачи данных и полосе пропускания	13
2.2.3 Коэффициенты пересчета между частотами приема и передачи.....	14
2.2.4 Мультиплексирование	14
2.2.5 Кодирование с исправлением ошибок и псевдослучайное шумовое кодирование	15
2.2.6 Методы модуляции	16
2.2.7 Захват сигналов в целях получения данных	16
2.2.8 Методы слежения.....	17
ГЛАВА 3 – Соображения, касающиеся полос частот для программ космических исследований	19
3.1 Соображения, касающиеся космических программ	19
3.2 Соображения, касающиеся оборудования	20
3.3 Факторы, влияющие на распространение и излучение радиоволн.....	20
3.4 Соображения, касающиеся эксплуатационных характеристик линий связи.....	21
3.5 Распределения частот службе космических исследований.....	22

ГЛАВА 4 – Критерии защиты службы космических исследований и соображения по совместному использованию частот	23
4.1 Соображения, касающиеся помех при космических исследованиях	23
4.2 Критерии защиты для службы космических исследований	24
4.3 Соображения, касающиеся совместного использования частот для служб космических исследований	25
4.3.1 Помехи, создаваемые земными станциями космических исследований	26
4.3.2 Помехи, создаваемые космическим аппаратам для исследования космоса ...	26
4.3.3 Помехи, создаваемые космическими аппаратами для исследования космоса	27
4.3.4 Помехи земным станциям службы космических исследований	27
4.3.5 Предельные значения нежелательных излучений, установленные МСЭ	28
ПРИЛАГАЕМЫЙ ДОКУМЕНТ 1	29
ПРИЛАГАЕМЫЙ ДОКУМЕНТ 2	32

ГЛАВА 1

Введение. Служба космических исследований

Международный союз электросвязи (МСЭ) обеспечивает возможность развития и рационального использования систем электросвязи во всем мире. Сектор радиосвязи МСЭ (МСЭ-R) стремится обеспечить рациональное, справедливое, эффективное и экономически выгодное использование исчерпаемых природных ресурсов радиочастотного спектра и спутниковых орбит и в качестве одной из научных служб включает в свой состав управление службы космических исследований (СКИ). Служба космических исследований использует конкретные распределения частот, указанные в Регламенте радиосвязи МСЭ (РР) (см. Прилагаемый документ 2). Дополнительные уточнения по использованию распределений частот службе космических исследований приведены в Рекомендациях МСЭ-R серии SA (Космические применения и метеорология) (см. Прилагаемый документ 1) на основе технических характеристик и эксплуатационных процедур.

1.1 Космические исследования. Общий обзор

Системы службы космических исследований включают разнообразные научные дисциплины и технологические программы, приносящие пользу человеку. Научные дисциплины снабжают нас информацией о Солнечной системе, основных свойствах и структуре Вселенной, а также о происхождении и развитии материи. В числе этих дисциплин:

- солнечно-земная физика;
- космическая физика;
- исследование планетарных систем.

В программах, изучающих солнечно-земное взаимодействие, особое внимание уделяется исследованиям Солнца, солнечной активности и ее влиянию на Землю. Исследования проводятся при помощи сети научных космических аппаратов, находящихся в различных районах межпланетного пространства, как правило между Солнцем и Землей, и оборудованных комплектами научно-исследовательских приборов для поиска и обнаружения солнечного электромагнитного излучения, а также плазменных частиц и волн.

Космофизические исследования посвящены изучению основных законов физики в нашей Солнечной системе и предоставляют нам информацию, которая используется для усовершенствования конструкции космических аппаратов, приборов и оборудования, а также улучшения их навигационных характеристик.

Изучение планет и их спутников, астероидов и комет проводится в целях получения сведений о происхождении и эволюции нашей Солнечной системы. Космические аппараты, зонды и планетарные посадочные модули снабжают нас обширной информацией о планетах нашей Солнечной системы и их спутниках.

Технологические программы космических исследований ориентированы на развитие и испытание в космосе передовых технологий, необходимых для решения следующих задач:

- производство и сборка космических конструкций;
- конструирование электрических механических систем;
- изучение поведения жидкостей и явлений переноса;
- автоматизация сборки конструкций и техническое обслуживание спутников на орбите;
- космические производственные и обрабатывающие технологии.

В частности, изучение микрогравитационной среды в космосе в научных и коммерческих целях развивает и улучшает способность человека жить и работать в космосе на протяжении длительного времени и повышает нашу компетентность в материаловедении и биомедицинских науках.

Различные виды систем космических исследований, используемых для научно-технических исследований в околоземном пространстве и в дальнем космосе, включают как пилотируемые (в том числе исследование космоса человеком, доставка экипажей и персонала на научные станции, проведение экспериментов и исследований из точек, расположенных в космосе), так и беспилотные программы (в частности, сбор физических образцов при помощи космических аппаратов, работающих в автоматическом режиме,

снабжение или техническое обслуживание исследовательских космических аппаратов и сбор данных зондирования и наблюдения с использованием космических аппаратов). Кроме того, эти системы включают сети передачи данных на поверхности Земли и сети передачи данных на геосинхронной орбите или за ее пределами. Космические исследовательские программы, рассчитанные на выполнение задач на расстояниях более 2×10^6 км от Земли, называются программами исследования дальнего космоса. Космические программы, выполняемые на расстояниях менее 2×10^6 км, обычно называются околоземными программами. В связи с наличием особых требований для систем, работающих в дальнем космосе, были приняты специальные положения по использованию спектра, обеспечивающие стабильную связь на больших расстояниях. На всех этапах программ исследования дальнего космоса используются одни и те же участки спектра и комплекты оборудования. Это связано с ограничениями по массе, объему и стоимости.

Этапы космических исследовательских программ – это предпусковой контроль, процедуры запуска, выход на орбиту и работы на орбите, а в пилотируемых полетах и полетах в автоматическом режиме – процедуры возврата на Землю и посадки. Для успешного выполнения каждого этапа программы требуются специальные системы связи и слежения. При выполнении процедуры запуска на критически важном этапе и при возникновении нештатных ситуаций применяются системы точного определения дальности, управления и самоуничтожения. При выполнении операций вывода на орбиту используются данные телеметрии, управления и слежения, обеспечивающие выход космического аппарата на заданную орбиту. Процедуры работы на орбите зачастую требуют наличия связи типа космос-космос между совместно работающими космическими аппаратами, а также связи с Землей либо напрямую, либо через геосинхронные спутники связи, которые называются спутниками ретрансляции данных. При выполнении пилотируемых полетов функции связи включают голосовую связь и видеосвязь, а также передачу данных управления, телеметрии и слежения. При выполнении программ в автоматическом режиме кроме передачи данных управления, телеметрии и слежения может возникнуть необходимость в видеосвязи. При выполнении межпланетных программ помимо связи между планетарным космическим аппаратом и Землей может потребоваться связь между орбитальными космическими аппаратами и аппаратами, работающими на поверхности Земли.

1.2 Характеристики программ космических исследований

1.2.1 Длительность программ космических исследований

Длительность программы космических исследований в основном складывается из времени полета (времени, прошедшем от запуска до прибытия в точку назначения) и фактического времени выполнения программы (времени, требуемого для проведения эксперимента, получения данных и выполнения целей программы). Для программ с доставкой образцов и пилотируемых полетов длительность включает также время обратного полета до Земли. Зачастую космические аппараты сохраняют работоспособность после окончания их расчетного срока службы и продолжают предоставлять ценную информацию ученым, занимающимся космическими исследованиями.

Для большинства программ в околоземном пространстве время полета, как правило, составляет небольшую часть от общей продолжительности программы. Фактическое время выполнения программы для типовых околоземных миссий в автоматическом режиме может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет. Спутники ретрансляции данных и космические станции являются исключением, поскольку их расчетный срок службы составляет от 10 до 15 лет. При выполнении орбитальных пилотируемых полетов и полетов вблизи Луны фактическое время выполнения программы может колебаться от нескольких дней до многих месяцев.

Время полета при выполнении программ в дальнем космосе может составлять значительную часть от общей продолжительности программы. Например, полет к планете Сатурн, расстояние до которой равно примерно $1,58 \times 10^9$ км, может занимать от 6 до 7 лет. В процессе полета на космические аппараты периодически посылаются запросы в целях проверки их состояния и режима работы бортового оборудования. Фактическое время выполнения программы для типовых полетов в дальнем космосе, как правило, составляет несколько лет. Продолжительность автоматических и пилотируемых полетов к астероидам, на Марс или другие небесные объекты измеряется месяцами и годами.

1.2.2 Орбиты программ космических исследований

При выполнении программ космических исследований используют несколько видов спутниковых орбит. Тип и характеристики орбиты выбираются на основе требований и оптимизации программы космических исследований. В большинстве программ космических исследований широко используются круговые орбиты. У таких орбит апоапсида и периапсида равны, то есть высота космического аппарата относительно поверхности Земли или другой исследуемой планеты всегда постоянна. Если полеты в рамках программы космических исследований выполняются вокруг Земли, то орбиты, как правило, расположены наклонно к плоскости экватора, а высота полета составляет от 300 до 1000 км. Из-за близости к Земле эти орбиты получили название низкие околоземные орбиты (LEO).

Круговые орбиты, наклонение которых близко к 90 градусам, называются "полярными". Такие орбиты используются в программах космических исследований, требующих охвата всей без исключения поверхности Земли. Прямая связь между спутником на полярной орбите и земной станцией, расположенной в полярном районе, может осуществляться на любой из орбит спутника.

Использование солнечно-синхронных орбит подразумевает, что орбитальная плоскость спутника остается практически неподвижной относительно Солнца. Значения наклонения орбиты составляют около 98 градусов. Эти орбиты могут, в частности, использоваться для наблюдений Солнца, Земли и в некоторых программах по прогнозированию погоды.

Отличительной особенностью эллиптических орбит является малое расстояние в перигее и большое расстояние в апогее. Такие орбиты, в частности высокие эллиптические орбиты, обеспечивают возможность сбора данных в диапазоне больших и малых высот и могут использоваться в множестве программ научных наблюдений. Ключевой характеристикой данного типа орбиты является высокая процентная доля времени, в течение которого спутник остается видимым для земной станции своей сети. Однако мощность сигнала может значительно колебаться при изменении расстояния между спутником и земной станцией.

Геостационарная орбита (ГСО) – это своеобразное кольцо вокруг экватора Земли на высоте 35 786 км. Период обращения спутника на данной орбите равен периоду вращения Земли. Таким образом, спутник на этой орбите постоянно видит примерно одну треть поверхности Земли и может поддерживать непрерывный контакт с земными станциями, находящимися в поле зрения данного спутника. ГСО используется службой космических исследований для размещения спутников ретрансляции данных (DRS) в целях обеспечения постоянной связи с космическими аппаратами, работающими на низкой околоземной орбите.

Информация об орбитальных местоположениях спутников DRS в службе космических исследований содержится в следующих рекомендациях МСЭ-R:

- Рекомендация МСЭ-R SA.1275 "Защита орбитальных местоположений спутников ретрансляции данных от излучений систем фиксированной службы, работающих в полосах частот 2200–2290 МГц";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1276 "Защита орбитальных местоположений спутников ретрансляции данных от излучений систем фиксированной службы, работающих в полосах частот 25,25–27,5 ГГц".

Орбиты вокруг точки равновесия между двумя небесными телами называют гало-орбитами. Плоскость данной орбиты перпендикулярна плоскости, на которой расположена линия прямой видимости между двумя телами. Точки Лагранжа L_1 и L_2 , расположенные на удалении около 1,5 млн км по обе стороны от Земли и на линии Земля–Солнце, могут служить примерами точек равновесия, вокруг которых существуют гало-орбиты, используемые в программах космических исследований.

Лунные и планетарные орбиты являются, как правило, круговыми по своей природе и используются при проведении экспериментов и измерений при помощи зондов, необходимых для решения задач, предусмотренных программой. При выполнении пилотируемых полетов к поверхности Луны лунные орбиты выполняют функцию орбиты сближения. Планетарные орбиты служат также орбитами для ретрансляционных спутников, обращающихся вокруг тела планеты. Многие программы предусматривают применение зондов или планетоходов, которые опускаются на поверхность планеты и собирают данные об окружающей среде и близлежащей местности. Обладая ограниченными энергоресурсами, эти локальные космические аппараты не способны передавать собранные данные на большие расстояния

(непосредственно на Землю), поэтому информация от них передается на орбитальные космические аппараты, которые затем ретранслируют ее на приемные станции, расположенные на Земле.

1.2.3 Виды программ космических исследований

Программы, предусматривающие перевозку грузов или персонала, например корабли "Союз" и "Прогресс" Российского федерального космического агентства, автоматический межорбитальный транспортный аппарат (ATV) Европейского космического агентства и межорбитальный транспортный аппарат Н-П (HTV) Японского агентства аэрокосмических исследований, требуют наличия связи с земными станциями либо напрямую, либо через системы DRS и с аппаратами, находящимися на той же орбите, для выполнения операций сближения/стыковки. Данные управления, телеметрии и слежения передаются по линиям связи. Для пилотируемых космических кораблей существуют дополнительные технические требования к аудио- и видеосвязи.

Для выполнения программ на кораблях, постоянно находящихся на орбите, таких как Международная космическая станция, требуется наличие связи с аппаратами, находящимися на той же орбите, и с землей. Как для транспортных кораблей, так и для станций, постоянно работающих на орбите, существуют требования по управлению, телеметрии и слежению, а также необходима дополнительная аудио- и видеосвязь. Эти услуги могут предоставляться через прямые линии связи сетевыми земными станциями или через непрямые линии связи при помощи систем DRS.

Работа в открытом космосе (EVA) предусматривает выход за пределы базовой станции либо на орбите (выход в открытый космос), либо на поверхности планеты. Системы связи, используемые при работе в открытом космосе, обеспечивают аудиосвязь и передачу данных с низкой скоростью между астронавтом и базовой станцией. Система связи должна встраиваться в скафандр, и это сильно ограничивает физический размер и энергопотребление системы EVA. В большинстве случаев работы, связанные с выходом в открытый космос, заключаются в сборке, техническом обслуживании и ремонте спутников и космических кораблей. Работы в открытом космосе на орбите, как правило, проводятся в радиусе 100 м от орбитального космического корабля. При проведении работ вне планетарных базовых станций, расположенных на поверхности Луны, Марса или других небесных тел, необходимо будет выполнять различные операции на удалении до нескольких десятков километров.

В рамках программ исследования Луны и планет проводятся научно-технические изыскания, в которых орбитальные космические корабли, зонды или планетоходы и базовые станции на поверхности конкретного небесного тела служат узлами связи при проведении расширенных пилотируемых и автоматических исследований. При проведении программ исследования Луны и планет необходима двусторонняя связь с Землей, а также местная связь на поверхности планеты.

Космические программы, использующие интерферометрию со сверхдлинной базой (VLBI), позволяют исследователям добиться углового разрешения наблюдаемых радиоисточников, которое недостижимо при помощи других радио- или оптических методов. Амплитуда и фаза сигналов от радиоисточников, принимаемых двумя или более независимыми станциями VLBI, взаимно коррелируются, что позволяет получить подробные данные о местоположении, а также информацию о структуре источника. В космических программах VLBI используется по крайней мере одна космическая станция, базовые линии наблюдения которой на несколько порядков превышают любую базовую линию на Земле. Данные, собранные космическими станциями VLBI, должны передаваться на земную станцию в реальном времени на скорости до 8 Гбит/с. Для когерентного переноса частоты наземного частотного стандарта по радиолинии передачи фазы Земля-космос требуются также линии передачи фазы космос-Земля. Такая обратная линия необходима для калибровки фазовых ошибок, возникающих на линии Земля-космос. Линия космос-Земля может быть специально выделена для операций по передаче фазы, а может одновременно использоваться для передачи данных с космических аппаратов.

Программы DRS обеспечивают непрерывную связь между космическими аппаратами на низкой околоземной орбите и отдельными земными станциями и одновременно могут поддерживать обмен данными с многопользовательскими космическими аппаратами, при этом скорость передачи данных может колебаться от низкой до очень высокой. Система из трех спутников-ретрансляторов с угловым разнесением 120 градусов теоретически способна обеспечить 100% покрытия для космических аппаратов на низкой околоземной орбите. Создание подобного идеального созвездия спутников DRS затрудняет такие факторы, как стоимость, выбор орбитальных позиций для спутников DRS и географическое расположение земных станций DRS. В общем, вероятнее всего будет развернуто созвездие, состоящее из двух спутников DRS. При этом ожидаются некоторые потери в площади покрытия космического

аппарата. При вхождении в тень Земли космический аппарат на низкой околоземной орбите теряет связь с обоими спутниками DRS, и, следовательно, с земной станцией DRS. Эта зона называется "зоной отсутствия связи". Если космический аппарат находится на эллиптической орбите или если необходима большая высота, зона покрытия ограничивается также угловым диапазоном поворота и наведения антенны спутника DRS. В Рекомендации МСЭ-R SA.1018 приведена дополнительная информация по компонентам программы DRS.

Программы исследования дальнего космоса расширяют наши познания о Солнечной системе и космосе на расстояниях свыше 2×10^6 км от Земли. Для программ исследований дальнего космоса характерны огромные расстояния. Некоторые из действующих программ выполняются на расстояниях свыше 17 млрд. км от Земли. Столь огромные расстояния требуют использования сверхсложного оборудования связи, а также передовых технологий и методов кодирования, позволяющих обеспечить надежную радиосвязь на этих гигантских расстояниях.

1.3 Системы космических исследований

1.3.1 Земной сегмент

Земные станции размещаются исходя из политических и экономических соображений, а также требований к конкретной программе космических исследований. Земные станции являются частью всемирной сети станций связи и слежения и работают во взаимодействии с пунктами обработки данных и коммутации и центрами управления, образуя сеть космических исследований. Связь и маршрутизация данных между сетевыми объектами, как правило, осуществляется наземными и фиксированными спутниковыми системами связи.

Антенны, используемые на земных станциях для космических исследований в околоземном пространстве, представляют собой, как правило, параболические отражатели диаметром от 6 до 30 м. Для поддержки операций слежения применяются также антенны типа "волновой канал", спиральные антенны, антенные решетки и антенны с веерной ДНА. При определении подходящего размера и типа антенны земной станции учитываются такие факторы, как требования программы, функциональные возможности космического аппарата, характеристики орбиты, рабочая частота и подвижность антенны земной станции, обеспечивающая точность наведения. Ширина луча антенны должна быть достаточной для учета любых угловых погрешностей при наведении. В Рекомендации МСЭ-R SA.1414 приведена подробная информация по земным станциям DRS и установленным на них антеннам.

Для земных станций исследования дальнего космоса характерны антенны очень большого диаметра (35–70 м), мощные передатчики и сверхчувствительные приемники. Все это оборудование необходимо для обеспечения надежной связи на огромных расстояниях, типичных для программ исследования дальнего космоса. Максимальное усиление антенны земной станции для исследования дальнего космоса ограничивается ее размером и точностью, с которой форма поверхности антенны приближается к идеальному параболоиду. На точность поверхности влияют такие факторы, как прецизионность изготовления, тепловые эффекты, жесткость опорных конструкций, деформация поверхности вследствие гравитации, ветер и переменные углы места. В связи с большими размерами и огромной стоимостью сооружения антенн земных станций для исследования дальнего космоса во всем мире установлено лишь несколько подобных антенн. В Рекомендации МСЭ-R SA.1014, Приложение 1, приведены более подробные характеристики земных станций для исследования дальнего космоса. В будущем системы, работающие на частотах около 283 ТГц, могут использоваться для связи в дальнем космосе благодаря гораздо более высокому усилению и меньшей ширине луча, которой можно добиться, применяя антенны меньшего размера. В Рекомендации МСЭ-R SA.1742 приведены подробные технические и эксплуатационные характеристики планируемых систем.

Обобщенная диаграмма направленности антенн земных станций для космических исследований приведена в Рекомендации МСЭ-R SA.509. Методы прогнозирования диаграмм направленности излучения больших антенн содержатся в Рекомендации МСЭ-R SA.1345, а в Рекомендации МСЭ-R SA.1811 приведены диаграммы направленности, используемые для анализа совместимости в диапазонах 32 и 37 ГГц.

Наименьший уровень сигнала, который может обнаружить приемник для космических исследований, ограничивается фоновым шумом, возникающим в приемнике, и шумом, создаваемым внешними источниками. При проведении операций в дальнем космосе ограниченная эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.) передатчика космического аппарата в совокупности с огромными

расстояниями распространения волн является причиной крайне слабых сигналов на приемной земной станции. Для обеспечения возможности обнаружения очень слабых сигналов и снижения энергопотребления передатчика космического аппарата шум в приемниках земных станций необходимо удерживать на минимально возможном уровне. Для операций, выполняемых в околоземном пространстве, мощность передаваемого сигнала и эффективная изотропно излучаемая мощность контролируются на предмет соответствия уровням плотности потока мощности (п.п.м.), указанным в Регламенте радиосвязи МСЭ, что влечет за собой потребность в малошумящих приемниках.

Основной вклад в общий шум системы вносит фоновый шум, обнаруживаемый антенной. Этот шум является функцией рабочей частоты, угла места антенны, метеорологических условий и теплового излучения Земли в направлении боковых и заднего лепестков антенны. На частотах ниже 1 ГГц небесный шум галактического происхождения и шум, возникающий вследствие вспышек на Солнце, увеличивается с понижением частоты. На частотах выше 1 ГГц галактический шум невелик, а небесный шум, зависящий главным образом от атмосферы Земли, начинает возрастать. Шум, обусловленный выпадением осадков, становится заметным на частотах около 4 ГГц и увеличивается с ростом частоты до значений 100 К и выше на частотах около 15 ГГц.

Типичные значения шумовой температуры для систем DRS приведены в таблицах, представленных в Рекомендации МСЭ-R SA.1414, Приложение 1, а для систем СКИ дальнего космоса – в Рекомендации МСЭ-R SA.1014. Типичные значения шумовой температуры системы в приемниках земных станций, используемые при проведении операций в околоземном пространстве и в дальнем космосе, показаны в Таблицах 1 и 2.

ТАБЛИЦА 1

Типичные значения шумовой температуры приемников земных станций для околоземных программ

Диапазон частот		Шумовая температура (К)
~2	ГГц	150
10–11	ГГц	160
13–15	ГГц	300
18–26	ГГц	200
37–38	ГГц	200

ТАБЛИЦА 2

Типичные значения шумовой температуры приемников земных станций для программ исследования дальнего космоса

Частота		Шумовая температура (К)	G/T (дБ/К)
2 290–2 300	МГц	16–21	51
8 400–8 450	МГц	23–27	60,4
12,75–13,25	ГГц	25–29	62
31,8–32,3	ГГц	52–61	66,4

Мощность и стабильность передатчика земной станции с технической точки зрения не представляют особой проблемы. Мощность и э.и.и.м. передаваемого сигнала зависят от ряда факторов, таких как рабочая частота, размер антенны, скорость передачи данных и характеристики приемной системы космического аппарата.

При работе в околоземном пространстве для каналов связи, имеющих высокие требования к скорости передачи данных, во внештатных ситуациях и для лунных программ используются значения эффективной изотропно излучаемой мощности порядка 60 дБВт. Для большинства программ исследования дальнего космоса требуется э.и.и.м. порядка 110 дБВт. Э.и.и.м. земной станции в направлении горизонта ограничивается требованиями Статьи 21 РР. Дополнительные ограничения применяются для каждого конкретного случая в целях соответствия требованиям и процедурам координации для земных станций.

1.3.2 Космический сегмент

Системы на борту космического аппарата должны соответствовать ограничениям по размеру, весу и энергопотреблению, а также содержать элементы, пригодные для космического применения. Кроме того, космические системы должны функционировать с максимальной эффективностью и высокой степенью надежности в экстремальных, а иногда и враждебных условиях космоса. Отказы системы могут привести к катастрофическим последствиям, которые, как правило, невозможно ликвидировать. В то время как в области космической связи был достигнут значительный прогресс, разработка нового оборудования, пригодного для космического применения, способного обеспечить улучшенные функциональные возможности, а также более эффективных систем связи, работающих в полосах более высоких частот, все еще продолжается и займет многие годы.

Условия работы на низкой околоземной орбите служат основной платформой для инноваций и исследований, ведущихся в области технологий космической связи. Опытные образцы оборудования проходят испытания в полетах на борту экспериментальных космических аппаратов и зачастую используются для тестирования и оценки в экспериментах по связи и слежению в рамках программ исследования околоземного пространства и дальнего космоса. Экспериментальные системы связи и слежения, которые полностью удовлетворяют стандартам космического применения, одобрены для

использования в будущих программах космических исследований. Ключевыми элементами системы связи космического аппарата являются антенна и приемник.

Во всех видах программ космических исследований используются ненаправленные антенны в качестве основной антенны космического аппарата, а также для обеспечения связи с аппаратом независимо от его пространственного положения. Ненаправленные антенны обладают широким лучом, обеспечивающим постоянный большой угол покрытия и сводящим к минимуму необходимость стабилизации и контроля пространственного положения космического аппарата. В некоторых программах ненаправленные антенны используются на космических аппаратах в качестве основных, а в других – только во время запуска, во внештатных ситуациях и для передачи данных с низкой скоростью. Отсутствие направленности может стать причиной серьезных проблем, связанных с многолучевым распространением в тех случаях, когда космический аппарат на низкой околоземной орбите устанавливает связь со спутником DRS при помощи ненаправленной антенны. Проблемы, связанные с многолучевым распространением, фактически отсутствующие при применении направленных антенн, в большинстве случаев решаются путем использования сигнала, модулированного псевдослучайным шумовым кодом.

Для обеспечения более высокого (по сравнению с ненаправленными антеннами) усиления в программах космических исследований используются также электронные фазовые антенные решетки, которые к тому же оборудованы электронным управлением, облегчающим поворот и наведение антенны в нужном направлении. Во многих экспериментах, связанных с космическими исследованиями, предпочтительнее использовать антенны с электронным, а не с механическим управлением, поскольку они позволяют предотвратить выход из строя бортовых комплексов научно-исследовательской аппаратуры и контрольно-измерительных систем, обладающих инерционной чувствительностью. В космических аппаратах на низкой околоземной орбите применяются как многогранные фазовые решетки, использующие фазовую компенсацию для наведения луча в нужном направлении, так и сферические или полусферические управляемые решетки, использующие формирование блоков элементов для наведения путем переключения элементов.

Антенны типа "фазовая решетка" применяются на спутниках DRS для обеспечения многостанционного доступа к космическому аппарату на низкой околоземной орбите, если требуется малая и средняя скорость передачи данных в диапазоне 2 ГГц. В режиме передачи на спутнике DRS формируется одиночный луч антенны, который наводится и управляется фазовращателями в каждом из передающих элементов. В режиме приема мультиплексированные сигналы от спутника на низкой околоземной орбите принимаются спутником DRS и передаются на центральную земную станцию, на которой они подвергаются демultipлексированию и передаются на устройство формирования луча. Далее фаза и амплитуда сигналов взвешиваются и объединяются по линейному закону, чтобы синтезировать луч для каждого космического аппарата на низкой околоземной орбите. Наведение луча производится путем вычисления весовых значений для каждого из сигналов приемной решетки элементов, полученных со спутника DRS.

Для крупногабаритных и более надежных космических аппаратов с повышенными требованиями к скорости передачи данных (от средней до высокой), а также для космических аппаратов, осуществляющих связь на больших расстояниях, необходимы направленные управляемые антенны с высоким усилением. На спутниках DRS для обеспечения связи Земля–космос и космос–космос применяются параболические зеркальные антенны. Помимо ограничений по размеру и весу, характеристики антенн космического аппарата зависят также от системы контроля пространственного положения аппарата, прецизионности антенн и способности наведения с требуемой точностью. Необходимо, чтобы тщательность изготовления поверхности антенн поддерживалась в пределах конструктивных допусков независимо от перепадов температур, вызванных солнечным излучением. Большинство антенн космических аппаратов должны одновременно выполнять функции передачи и приема, а также, если речь идет о спутниках DRS, обеспечивать связь в различных полосах частот, при этом осуществляя точное наведение антенн и отслеживание движения космического аппарата на низкой околоземной орбите. Для выполнения подобных деликатных процедур, требующих повышенной точности, применяется сложная фидерная система и управляемый узел с карданной передачей. Фидерная система предназначена для оптимизации усиления антенны в планируемом рабочем диапазоне. Узел с карданной передачей механически управляет антенной, нацеливая ее в нужном направлении. В ситуациях, когда необходим расчет помех и отсутствуют диаграммы направленности для направленной антенны космического аппарата, обладающей высоким усилением, для получения огибающей пиков боковых лепестков антенны может использоваться следующая эталонная диаграмма направленности излучения антенны, взятая из Рекомендации МСЭ-R S.672:

$$G(\varphi) = G_m - 3(\varphi/\varphi_0)^2 \quad \text{для} \quad \varphi_0 \leq \varphi \leq 2,58 \varphi_0;$$

$$G(\varphi) = G_m - 20 \quad \text{для} \quad 2,58 \varphi_0 < \varphi \leq 6,32 \varphi_0;$$

$$G(\varphi) = G_m - 25 \log(\varphi/\varphi_0) \quad \text{для} \quad 6,32 \varphi_0 < \varphi \leq \varphi_1;$$

$$G(\varphi) = 0 \quad \text{для} \quad \varphi_1 < \varphi,$$

где:

$G(\varphi)$ – усиление при угле φ от оси (дБи);

G_m – максимальное усиление в главном лепестке (дБи);

φ_0 – половина ширины луча на уровне 3 дБ = $0,5 \sqrt{27\,000/(10^{G_m/10})}$ градусов;

φ_1 – значение φ , при котором усиление $G(\varphi)$ в третьем уравнении равно 0 дБи = $\varphi_0 10^{G_m/25}$ градусов.

В целях уменьшения размера и веса системы связи и слежения малошумящие приемники на космических аппаратах, как правило, не применяются. Для компенсации низкой чувствительности приемников космических аппаратов используются мощные передатчики земных станций. Поскольку большинство антенн космических аппаратов видят передатчики земных станций на фоне 290 К (температуры поверхности Земли), приемники с намного меньшей температурой не имеют особых преимуществ. Эти факторы, вкуче со стоимостью, сложностью и надежностью, определяют шумовую температуру приемника, необходимую для конкретного космического аппарата. Типичные значения рабочей шумовой температуры для приемников DRS приведены в таблицах Рекомендации МСЭ-R SA.1414, Приложение 1, а для приемников космических аппаратов систем СКИ дальнего космоса – в Рекомендации МСЭ-R SA.1014. Типичные значения рабочей шумовой температуры приемников космических аппаратов, используемых при выполнении программ в околоземном пространстве и в дальнем космосе, показаны в Таблицах 3 и 4.

ТАБЛИЦА 3

Типичные значения шумовой температуры приемников космических аппаратов для программ исследования околоземного пространства

Диапазон частот		Шумовая температура приемника (К)
100–500	МГц	700–900
500–1 000	МГц	600–700
1–10	ГГц	600–800
10–20	ГГц	800–1 200
> 20	ГГц	1 200–1 500

ТАБЛИЦА 4

**Типичные значения шумовой температуры приемников космических аппаратов
для программ исследования дальнего космоса**

Частота		Шумовая температура приемника (К)
2 110–2 120	МГц	200
7 145–7 190	МГц	330
16,6–17,1	ГГц	910
34,2–34,7	ГГц	2 000

Опыт разработки и применения полупроводниковых передатчиков показал, что они хорошо подходят для различных широкополосных приложений в космических исследованиях. Благодаря малому размеру, низкому рабочему напряжению и отсутствию проблем с отводом тепла у этих устройств общий вес передатчика значительно ниже, чем у аналогичного оборудования на вакуумных лампах. Вакуумные лампы, в частности лампы бегущей волны, до сих пор используются в программах с высоким энергопотреблением и при работе в более высоких полосах частот. Мощность передатчика ограничивается не столько технологией, используемой в его конструкции, сколько мощностью энергосистемы космического аппарата исследования дальнего космоса.

Предельная плотность потока мощности у поверхности Земли, установленная Регламентом радиосвязи, ограничивает максимальную мощность и э.и.и.м. передатчика космического аппарата в конкретных полосах частот. В таких случаях в программах космических исследований применяются методы модуляции с расширением спектра, позволяющие поддерживать функциональные характеристики линии связи и соблюдать ограничения плотности потока мощности, установленные международными соглашениями.

Диапазоны мощности передатчиков для систем DRS приведены в таблицах Приложения 1 к Рекомендации МСЭ-R SA.1414. Мощность передатчиков космических аппаратов исследования околоземного пространства составляет 2–10 Вт, а аппаратов исследования дальнего космоса – 5–100 Вт.

В будущем системы, работающие на частотах свыше 200 ТГц, также будут действовать на линиях связи космос-космос в околоземном пространстве и на линиях связи космос-Земля для исследований дальнего космоса. Преимуществом данных систем являются остронаправленные антенны, которые, в свою очередь требуют исключительно точного наведения. В Регламенте радиосвязи данные системы не рассматриваются, поскольку определение радиоволн условно ограничивается частотой 3 ТГц. Однако исследовательским комиссиям МСЭ-R разрешено проводить исследования и разрабатывать рекомендации, касающиеся их использования.

ГЛАВА 2

Функции связи и слежения для космических исследований и их техническая реализация

Три основные функции космических аппаратов, о которых пойдет речь дальше, – управление, телеметрия и слежение – являются функциями космической эксплуатации. Программы космических исследований используют распределенные им полосы частот для выполнения функций космической эксплуатации, а также для передачи телеметрических данных в рамках отдельно взятой системы радиосвязи. Это позволяет более эффективно использовать радиочастотный спектр, а также снижает требования к мощности, пространству для размещения компонентов и весу космического аппарата. За кратким обзором функций следует рассмотрение методов технической реализации систем связи и слежения для космических исследований. Более подробные технические сведения о системах исследования дальнего космоса содержатся в Рекомендации МСЭ-R SA.1014.

2.1 Функции

2.1.1 Передача сигналов управления (команд)

Сигналы управления обеспечивают работу систем наведения и управления космическим аппаратом, активируют различные функции программы, изменяют режимы работы космического аппарата или его бортового оборудования, а также предотвращают сбои в эксплуатации. При выполнении процедур запуска большинство сигналов управления записываются и передаются бортовым программируемым командоаппаратом. Сигналы управления Земля-космос передаются для выполнения в реальном времени или могут быть сохранены для последовательного выполнения операций в будущем. Критически важные сигналы управления зачастую передаются в два этапа – в первой команде задается конфигурация необходимой операции, а вторая команда выполняет эту операцию. Для выполнения операции в два этапа необходимо, чтобы обе команды были успешно приняты.

2.1.2 Передача телеметрических данных космического аппарата

Телеметрическая подсистема космического аппарата передает данные о состоянии его систем и бортового оборудования, а также отправляет результаты измерений, произведенных приборами космического аппарата, на определенную земную станцию. Кроме того, эта система сообщает о результатах приема и выполнения сигналов управления. Телеметрические данные могут быть сохранены и отправлены позже. В ряде случаев требуется передача в реальном времени, например при запуске или работе во внештатных ситуациях.

2.1.3 Передача полетных телеметрических данных

Подсистема полетных телеметрических данных отвечает за передачу на Землю научно-технических данных, собранных в ходе проведения экспериментов, активного и пассивного зондирования, а также компьютерных данных, формируемых космическим аппаратом и бортовыми устройствами, например зондами и посадочными модулями. При выполнении пилотируемых полетов в функции телеметрической подсистемы входит также передача аудио- и видеосигналов.

2.1.4 Слежение

Слежение является одной из основных задач программы космических исследований. Помимо предоставления информации, требуемой для определения местоположения и скорости космического аппарата, функция слежения необходима для оценки параметров запуска и выхода на орбиту, для коррекции траектории, для точного отсчета времени при выполнении критически важных маневров, таких как торможение с помощью ракетных двигателей, а также для прогнозирования видимости с космического аппарата и углов наведения антенн, требуемых для космического аппарата и земных станций.

2.1.5 Научные исследования с помощью радиосвязи

Радиосвязь играет важную роль в научных исследованиях дальнего космоса. В качестве инструментов используются системы связи и слежения космических аппаратов. Радиосигналы в дальнем космосе на пути к космическим аппаратам и обратно проходят через самые разнообразные среды и могут служить ценным источником данных о пространстве, через которое они проходят; при этом важной информацией являются данные о влиянии среды на различные параметры сигналов.

Методы научных исследований с помощью радиосвязи позволяют также измерить влияние сил, действующих на космический аппарат и проявляющихся в виде доплеровского смещения. Измеренные параметры, такие как амплитуда, фаза, частота, спектральный состав, поляризация и групповая скорость, используются для получения информации о различных геофизических явлениях, таких как атмосфера планеты, планетарные кольца, поверхность планеты, планетарная гравитация и внутренняя структура, а также для изучения аспектов общей теории относительности и фундаментальной физики, касающихся гравитации. Измерения в рамках научных исследований с помощью радиосвязи предъявляют весьма жесткие требования к прецизионности, точности, стабильности и методам наблюдений. Эти измерения зачастую устанавливают новые эксплуатационные показатели и приводят к усовершенствованию методов связи в дальнем космосе, что приносит пользу и другим потребителям.

2.2 Техническая реализация

2.2.1 Надежность, требования к коэффициенту ошибок по битам и энергетический запас линии

Подсистема управления исключительно важна для обеспечения безопасности и успешного выполнения программы космических исследований и должна функционировать с высокой степенью надежности при любых неблагоприятных условиях передачи сигналов, например в условиях неблагоприятной погоды или радиопомех. В программах исследования дальнего космоса время распространения сигнала, то есть время, за которое сигнал проходит огромное расстояние между космическим аппаратом и земной станцией, является дополнительным фактором, влияющим на надежность линии управления. Задержка при распознавании и при повторении неудачной команды может привести к аварийной ситуации и нарушению хода всей программы, которое обычно обходится очень дорого.

Требования к надежности для подсистем телеметрии и слежения, как правило, менее жесткие, чем для подсистем управления, поскольку потерянные при передаче или ошибочные данные могут быть переданы повторно, и это не слишком сильно повлияет на безопасность или успешное выполнение программы. Однако на критически важных этапах программы надежность подсистем телеметрии и слежения имеет не меньшее значение, чем надежность линии управления. При проведении пилотируемых полетов передаются жизненно важные медицинские данные, при этом для связи требуются свободные, работающие без перебоев аудиоканалы, а также предъявляются минимальные требования к качеству видеоизображений. Все эти факторы также влияют на надежность.

Требуемый уровень надежности линий связи для космических исследований во время выполнения в рамках программы критически важных процедур и операций составляет 99,99%. В связи с этим были установлены следующие требования:

- не зависящие от погодных условий линии связи Земля-космос и космос-Земля;
- высокие уровни э.и.и.м. земной станции, позволяющие компенсировать небольшое усиление ненаправленных антенн, применяемых на многих космических аппаратах, особенно во время запуска, на разных этапах вывода на орбиту и при работе во внештатных ситуациях;
- коэффициент ошибок по битам (BER) менее 1×10^{-5} (для сигналов управления DRS менее 1×10^{-6});
- кодирование сигналов управления для обеспечения достаточно четкого подавления ложных команд, причиной которых являются пакеты ошибок, замирание или побочные сигналы;
- достаточная ширина полосы пропускания для передачи всей необходимой информации.

Ограничения по весу и энергопотреблению космических аппаратов, а также применяемые на них типы антенн оказывают значительное влияние на функциональные характеристики системы связи, слежения и телеметрии космического аппарата и, как следствие, на энергетический запас линии связи системы. Большие расстояния передачи сигналов являются дополнительным фактором для программ исследования

дальнего космоса. Энергетический запас линии связи для службы космических исследований обычно составляет от 2 до 6 дБ. Предпочтительная методика расчета эксплуатационных характеристик линии связи в службе космических исследований приведена в Отчете МСЭ-R SA.2183. Требования к линии связи и методы расчета, относящиеся к передаче сигналов в дальнем космосе на частоте 283 ТГц, приведены в Рекомендации МСЭ-R SA.1742. Аналогичные требования к линиям связи космос-космос для космических исследований на частотах 354 ТГц и 366 ТГц приведены в Рекомендации МСЭ-R SA.1805.

2.2.2 Требования к скорости передачи данных и полосе пропускания

Основными факторами для определения необходимой ширины полосы пропускания являются требования к скорости передачи данных по каналам связи для различных космических аппаратов. Скорость передачи телеметрических данных зависит от типа программы космических исследований, конструктивной сложности космического аппарата, емкости хранилища данных космического аппарата и доступности космического аппарата для земных станций во время сеансов связи. При выполнении пилотируемых полетов от надежности аудио- и видеосвязи зависит успешное завершение программы и безопасность астронавтов. Фидерные линии DRS представляют собой составной канал, образованный путем уплотнения каналов клиентского космического аппарата на низкой околоземной орбите наряду с каналами телеметрии и измерения дальности спутника DRS и пилотным сигналом.

Измерение дальности является критически важной процедурой для работы в околоземном пространстве, однако наибольшее значение это имеет для программ исследования дальнего космоса. Соображения, касающиеся точности измерения дальности, зачастую являются важными аспектами при определении суммарной ширины полосы канала в программах исследования дальнего космоса.

Если для выполнения одной программы требуются два или более космических аппаратов, могут возникать моменты, когда несколько космических аппаратов, участвующих в программе, попадают в пределы ширины луча антенны общей земной станции и требуют одновременного соединения. Для выполнения этого эксплуатационного требования необходима ширина полосы пропускания земной станции, достаточная для прохождения сигналов от нескольких космических аппаратов.

Требования к ширине полосы для программ космических исследований подробно рассматриваются в следующих Рекомендациях МСЭ-R:

- Рекомендация МСЭ-R SA.364 "Предпочтительные частоты и ширина полос для пилотируемых и беспилотных околоземных исследовательских спутников";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1015 "Требования к ширине полосы для исследования дальнего космоса";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1019 "Предпочтительные полосы частот и направления передачи для спутниковых систем ретрансляции данных";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1344 "Предпочтительные полосы частот и значения ширины полосы для передачи данных космической VLBI".

2.2.3 Коэффициенты пересчета между частотами приема и передачи

Частота сигнала, передаваемого космическим аппаратом, во многих случаях когерентно связана с несущей частотой сигнала, принимаемого с земной станции или со спутника ретрансляции данных (DRS). Основой данного соотношения частот служит специальный множитель – коэффициент пересчета между частотами приема и передачи, который применяется в космическом аппарате:

$$\text{Частота}_{\text{передачи}} = \text{Частота}_{\text{приема}} \times \text{Коэффициент пересчета между частотами.}$$

Коэффициенты пересчета для космических исследований зависят от используемой полосы частот, как указано в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5

Коэффициенты пересчета между частотами приема и передачи для космических исследований

Полоса частот (ГГц/ГГц)	Коэффициент пересчета (линия вниз/линия вверх)
2/2	240/221
8/7	880/749
15/13	1 600/1 469
32/34	3 328/3 599
	3 344/3 599
	3 360/3 599

2.2.4 Мультиплексирование

Служба космических исследований использует мультиплексирование как с временным (TDM), так и с частотным (FDM) разделением каналов. TDM используется при проведении исследований дальнего космоса для размещения пакетов цифровых данных от различных приборов, работающих на борту космического аппарата, в единый поток информации. Такой подход упрощает передачу исходных данных стандартным автоматизированным способом. При использовании DRS (спутников ретрансляции данных) TDM применяется для ретрансляции сигналов управления на космический аппарат с многостанционным доступом и для предоставления дискретных каналов между наземными станциями и космическими аппаратами.

FDM также применяется и при работе со спутниками DRS. Командные данные подвергаются предварительной обработке и асинхронно складываются по модулю 2 с псевдослучайным шумовым кодом (PN) канала управления (космические аппараты, работающие на низкой околоземной орбите, используют псевдослучайный шумовой код канала управления для обнаружения сигнала). Затем при помощи полученной суммы кода и данных выполняется бифазная модуляция промежуточной несущей частоты канала управления. Если требуется измерение дальности, то длинный псевдослучайный шумовой код производит бифазную модуляцию промежуточной несущей частоты канала измерения дальности. Далее канал измерения дальности объединяется с каналом управления со сдвигом РЧ-сигнала по фазе на 90 градусов. Затем ПЧ-сигнал с выхода четырехфазного модулятора выравнивается, преобразуется по частоте, усиливается и подается на устройство уплотнения РЧ-сигналов, где пассивным образом формируется составной сигнал прямой линии связи вместе с сигналами для других космических аппаратов на низкой околоземной орбите, информацией прямого канала управления DRS и пилотным сигналом. В конце концов составной канал перенаправляется на выбранную передающую антенну для последующей передачи на спутник DRS. На спутнике DRS принимаемый сигнал подвергается преобразованию в ПЧ, усилению, фильтрации и демультиплексированию. Сигналы, предназначенные для передачи на различные космические аппараты на низкой околоземной орбите, подвергаются необходимому преобразованию частоты, усиливаются и передаются при помощи соответствующей антенны на космический аппарат. Прямой канал управления и пилотный сигнал DRS подвергаются преобразованию частоты и передаются на подсистему космической эксплуатации DRS.

Обратные операции производятся аналогичным образом, за исключением того, что поток сигналов передается в обратном направлении. Сигналы космических аппаратов на низкой околоземной орбите принимаются антенной DRS, усиливаются, преобразуются с понижением частоты до ПЧ и передаются на устройство обработки обратного сигнала, где мультиплексируются с сигналами, принимаемыми другими космическими аппаратами на низкой околоземной орбите, телеметрическими данными DRS и пилотным сигналом обратного канала связи. Составной сигнал обратного канала преобразуется с повышением по частоте, усиливается и передается на Землю при помощи антенны фидерной линии DRS. Сигналы от космических аппаратов со сверхскоростными обратными каналами передачи данных, работающих на низкой околоземной орбите, не мультиплексируются с другими принимаемыми сигналами. Эти сигналы перенаправляются на специально выделенное устройство обработки обратного сигнала, где преобразуются с повышением частоты и усиливаются, формируя сигнал выделенного обратного канала для передачи на приемную земную станцию.

2.2.5 Кодирование с исправлением ошибок и псевдослучайное шумовое кодирование

Методы кодирования с исправлением ошибок часто используются для улучшения коэффициента ошибок по битам (BER) в системах связи для космических исследований. Однако применение этих методов требует увеличения ширины полосы сигнала, так как они вносят в сообщение избыточную информацию до его передачи. Данный тип кодирования позволяет корректировать ошибки передачи, поэтому мощность передаваемого сигнала может быть снижена. На космических аппаратах с ограниченной мощностью целесообразным является умеренное использование кодирования с исправлением ошибок для обеспечения более высокого энергетического запаса системы.

Коды коррекции ошибок могут использоваться для коррекции отдельных ошибок по битам или пакетов ошибок. Необходим компромисс между эффективностью исправления влияния конкретной ошибки и затратами и/или задержкой по времени, требуемыми для физической реализации таких кодов. Базовый код коррекции ошибок, используемый в службе космических исследований, – это прозрачный сверточный код (скорость $1/2$, длина кодового ограничения 7), хорошо подходящий для каналов, в которых преобладает гауссов шум. Сверточное кодирование на космических аппаратах и последовательное декодирование на наземных терминалах улучшают общие функциональные характеристики системы вне зависимости от метода модуляции. Код Рида–Соломона (RS), как правило, добавляется для снижения вероятности ошибок, а не для снижения показателя E_b/N_0 . Код RS, применявшийся во многих программах исследования дальнего космоса, является мощным кодом коррекции пакетов ошибок и имеет крайне низкий коэффициент необнаруженных ошибок. Данный код может использоваться либо сам по себе, обеспечивая хорошую упреждающую коррекцию в канале с импульсными помехами, либо совместно со сверточными кодами, при этом сверточный код является внутренним кодом, а код RS – внешним. Эта конфигурация может также использоваться с перемежением. Перемежитель, помещенный между внешним RS-кодом и внутренним сверточным кодом разделяет любые пакеты импульсов, которые появляются в выходном сигнале, декодированном сверточным кодом.

Система кодирования псевдослучайным шумом (PN) – это интегрированная система, обеспечивающая одновременное выполнение таких функций, как передача данных и измерение дальности в едином интегрированном сигнале, который применяется во многих программах исследования околоземного пространства и дальнего космоса. Система PN-кодирования способна обеспечить защиту от помех вследствие многолучевости, даже на очень малых высотах, в начале процесса запуска космического аппарата. Следящий приемник с PN-кодом блокирует источники узкополосных помех, а шум и широкополосные помехи блокируются при демодуляции узкополосного сигнала в фазовом следящем приемнике. Еще одним преимуществом систем с PN-кодированием является то, что при PN-модуляции мощность передатчика распределяется на более широкую полосу пропускания. При этом плотность потока мощности на поверхности Земли поддерживается на уровнях, не превышающих указанные в Регламенте радиосвязи МСЭ.

Системы с PN-кодированием используются для осуществления связи со спутниками DRS благодаря их способности обеспечивать достоверную идентификацию и мультиплексирование сигналов большого количества космических аппаратов через общий канал. Координация библиотек псевдослучайного кода позволяет обеспечить взаимодействие между организациями и избежать взаимных помех. При классификации библиотек кодов используются два типа PN-кодов – коды Голда (короткие коды) и коды максимальной длины (длинные коды). Коды Голда – это класс кодов, обладающих низкими показателями перекрестной корреляции. Короткие коды используются для быстрого обнаружения сигналов. Коды Голда

применяются в канале управления прямой линии связи и при передачах сигналов космическими аппаратами, для которых требуется некогерентная обратная линия связи. Коды максимальной длины значительно длиннее кодов Голда и используются для выполнения достоверного разрешения неопределенностей при измерении дальности.

Синхронные PN-коды прямой и обратной линий связи позволяют выполнять точные измерения дальности (когерентную приемопередачу) путем сравнения относительных фаз передающего и приемного генераторов PN-кода на наземном терминале. Для линий связи DRS эта система может обеспечивать компенсацию доплеровского сдвига от земной станции до космического аппарата и обратно. Благодаря этому любое доплеровское влияние, обусловленное перемещением спутника DRS, не снижает общие показатели работы системы и не приводит к появлению погрешностей.

2.2.6 Методы модуляции

Считается, что все более интенсивное использование методов цифровой фазовой модуляции (ФМ) в будущем приведет к полной замене аналоговых систем, в то время как аналоговые методы модуляции еще используются в некоторых программах космических исследований. В программах исследования дальнего космоса, для которых требованиями по передаче телеметрических данных предусмотрена скорость менее 4 кбит/с, при незначительном количестве телеметрических данных и последующей фазовой модуляции несущей используется двоичная фазовая манипуляция прямоугольной поднесущей. Соответствующий коэффициент модуляции в результате дает остаточную несущую, которая используется для отслеживания принимаемого сигнала. Использование этого метода фактически позволяет вывести мощность передачи данных за пределы полосы пропускания системы отслеживания несущей в приемнике, сохраняет простоту конструкции космического аппарата и обеспечивает надежность и оптимальные эксплуатационные показатели линии электросвязи.

В системах, работающих в околоземном пространстве, и системах DRS используются различные варианты фазовой модуляции. В околоземных программах, как правило, используется двоичная фазовая манипуляция (BPSK) для одиночного канала данных, квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) для двух независимых каналов и гауссовская манипуляция с минимальным сдвигом (GMSK) или 8PSK для передачи сигнала с эффективным использованием полосы пропускания. Системы DRS, в случае их доступности, являются оптимальным выбором системы связи для программ исследования околоземного пространства. Помимо несбалансированной квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) в системах DRS используется распределение псевдослучайного шума. Системы, работающие на частотах выше 200 ТГц, как правило, основаны на методах фазово-импульсной модуляции (ФИМ), которые предусматривают непосредственное обнаружение передаваемого сигнала и позволяют обойтись без когерентных приемников.

2.2.7 Захват сигналов в целях получения данных

Захват сигналов в целях получения данных предполагает установление канала связи между космическим аппаратом и земной станцией, обеспечивающего непрерывную передачу потока данных между этими объектами. В программах исследования дальнего космоса, программах с использованием DRS, пилотируемых околоземных полетах и программах, выполняемых в реальном времени, захват сигнала в целях получения данных является ключевым элементом последовательности действий при установлении канала связи.

Для передачи важных данных слежения за космическим аппаратом в большинстве систем связи для космических исследований требуется когерентный режим работы. Для работы в данном режиме прямой канал связи от земной станции к космическому аппарату должен быть установлен раньше обратного канала и последующей передачи потока данных между космическим аппаратом и земной станцией. Благодаря этому несущая частота обратного канала от космического аппарата и PN-код (измерения дальности) будут когерентно соотнесены и привязаны к принимаемому сигналу прямого канала от земной станции. Дополнительная сложность работы с DRS заключается в необходимости маршрутизации сигналов прямого и обратного каналов через спутник DRS.

В некогерентном режиме не требуется получение частоты несущей и кода прямого сигнала до инициирования обратного сигнала. Космический аппарат передает в направлении принимающей земной станции сигнал с уровнем э.и.и.м., соответствующим скорости передачи данных. Полученные заранее сведения о частоте местного генератора космического аппарата позволяют земной станции (или спутнику DRS) осуществлять поиск и захват входящего сигнала и синхронизацию с ним. Односторонний эффект

Доплера обусловлен частотой принимаемого сигнала и погрешностью местного генератора космического аппарата.

Длительность процесса захвата сигнала для получения данных, как правило, невелика и составляет примерно 5–10 с. Однако при возникновении помех, которые могут привести к потере сигнала или рассинхронизации несущего сигнала с системой отслеживания несущей, повторный захват сигнала возможен только через несколько минут.

2.2.8 Методы слежения

Радиолокационное слежение используется при запуске космических аппаратов. В конструкции многих космических аппаратов предусмотрена возможность установки радиомаяков или ретрансляторов для операций по слежению. Таким образом, слежение не зависит от маломощных отраженных сигналов. Как правило, из-за затухания волн в атмосфере режимы работы радиолокаторов ограничены частотами ниже 6 ГГц.

Когерентное и некогерентное сопровождение по дальности, а также слежение по скорости изменения дальности обеспечивает точность слежения, которая превосходит показатели наземных радиолокационных сетей. Дальность или расстояние определяются путем измерения времени прохождения радиосигнала от земной станции до космического аппарата и обратно. Скорость изменения дальности определяется путем измерения доплеровского сдвига сигнала по частоте. В некогерентном режиме местный генератор космического аппарата генерирует и передает эталонную несущую частоту, которая известна на приемной земной станции. Для определения доплеровских сдвигов система выделения доплеровской частоты на земной станции сравнивает частоту принимаемого сигнала с локально генерируемой эталонной частотой.

Когерентный режим обеспечивает двусторонние измерения дальности и доплеровского сдвига. Земная станция передает сигнал на несущей частоте, модулированный специальным кодом измерения дальности. Космический аппарат принимает сигнал и синхронизируется по фазе с принимаемой частотой, а затем генерирует сигнал передачи на несущей частоте, когерентный с принимаемым сигналом. Частота когерентного сигнала определяется на основе коэффициента пересчета между частотами приема и передачи, который задается космическим агентством или сетью. Космический аппарат генерирует код измерения дальности, синхронизированный с кодом измерения дальности в составе принимаемого сигнала, который используется для модуляции частоты передаваемого сигнала. Для определения показателей доплеровского сдвига земная станция принимает и синхронизирует по фазе входящий сигнал, а затем сравнивает его с эталонным сигналом, первоначально отправленным земной станцией. Показатели дальности определяются на земной станции путем измерения времени, прошедшего с момента передачи элементов с кодом измерения дальности в прямом канале до момента обратного приема тех же элементов на земной станции.

Интерферометрия со сверхдлинной базой (VLBI) используется главным образом в астрономических и геодезических исследованиях. VLBI оказывает помощь при навигации для программ исследования дальнего космоса путем реализации небесной и земной систем координат. Небесная система координат задается по каталогу внегалактических радиоисточников, земная – по таблицам координат станций и геодезическим моделям, а таблицы ориентации Земли (прецессия, нутация, UT1, движение полюсов) связывают воедино эти системы координат. VLBI предоставляет инструменты для расчета параметров, определяющих системы координат путем точного измерения разницы во времени прихода сигналов от внегалактических радиоисточников, принимаемых на двух удаленных друг от друга земных станциях. К примеру, при использовании нескольких подобных измерений местоположение земных станций может быть определено с относительной точностью в 1 см. Для разработки системы координат с помощью VLBI используются частоты вблизи 2, 8 и 32 ГГц.

Точность навигации космического аппарата зависит от достоверно известных параметров, которые определяют навигационную систему координат. Например, погрешность в 3 м для предполагаемого местоположения земной станции приводит к ошибке в расчете местоположения космического аппарата у планеты Сатурн, составляющей около 700 км. Помимо разработки системы координат, метод на основе VLBI под названием дифференциальное одностороннее измерение дальности (DOR) используется также для прямого измерения углового положения космического аппарата. Измерения углового положения являются естественным дополнением к измерениям дальности прямой видимости и доплеровского сдвига. Две или несколько земных станций поочередно измеряют параметры сигнала от космического аппарата и сигнала от близлежащего (по углу) внегалактического источника радиосигналов, выбранного из каталога

небесных источников. Угловое положение космического аппарата по отношению к небесным источникам может быть определено путем точного измерения временной задержки для каждого источника и при наличии сведений о параметрах системы координат.

Измерение дальности включает передачу двух или более частот для формирования сигнала с достаточной шириной полосы, позволяющей измерять групповую задержку (то есть тона измерения дальности или просто тона). Главный и второстепенные тоны находятся в диапазоне от нескольких килогерц до нескольких мегагерц. Побочные тоны используются для разрешения неопределенностей. Для исследований в дальнем космосе применяются псевдошумовые системы определения дальности с тактовым генератором в мегагерцевом диапазоне. Для системы VLBI космического аппарата необходимо разнесение тонов в диапазоне от $1/5500$ до $1/400$ основной несущей частоты космического аппарата, чтобы обеспечить точное измерение задержки. Таким образом, для работы в полосе 8 ГГц требуются тоны от 1,5 МГц до 20 МГц.

Система двустороннего определения дальности спутника DRS с использованием транспондеров (BRTS) обеспечивает точное определение орбитальных параметров спутника DRS при помощи фиксированных ретрансляторов (транспондеров), установленных в различных районах земного шара и на каждом спутнике DRS. Данный метод триангуляции применяется для измерения расстояния до спутника DRS и положения этого спутника относительно двух известных точек, а также предоставляет данные слежения для точного определения эфемерид каждого спутника DRS, находящегося на орбите.

ГЛАВА 3

Соображения, касающиеся полос частот для программ космических исследований

К числу факторов, влияющих на возможность использования конкретных частот в программах космических исследований, относятся требования к этим программам, наличие и стоимость оборудования, факторы, влияющие на распространение и излучение радиоволн, эксплуатационные характеристики линий связи и существующие распределения частот. Потребности в новых распределениях частот для космических исследований определяются на основе меняющихся требований к программам таких исследований и влияния физических факторов.

3.1 Соображения, касающиеся космических программ

Для поддержки функций управления, телеметрии и слежения в программах космических исследований необходимы разнообразные типы данных. Для выполнения пилотируемых полетов требуется передача аудио- и видеoinформации в реальном времени. Для обеспечения эффективного использования радиочастотного спектра эти сигналы обычно мультиплексируются на одной несущей частоте.

Распределения более высоких частот, как правило, предусматривают распределения более широких полос частот. Распределения более широких полос обеспечивают возможность поддержания требований к более высокой скорости передачи данных, работу видеосвязи и возможность применения усложненных схем кодирования, позволяющих значительно уменьшить частоту появления ошибок и повысить помехозащищенность.

Если угловой разнос космического аппарата достаточно широк, частоты могут использоваться повторно. Однако если орбитальные характеристики космических аппаратов и условия передачи сигналов предполагают возможное наличие помех, то необходимо использовать разные частоты.

Для точного слежения необходимо, чтобы частоты сигналов слежения Земля-космос и космос-Земля были когерентно связаны коэффициентом пересчета между частотами приема и передачи. Данное требование соблюдается, если разнос частоты прямого и обратного каналов составляет 6–10% от более высокой частоты.

Полосы частот для активного и пассивного зондирования зависят от конкретных изучаемых характеристик объекта, космической среды или определенного исследуемого космического явления. Полосы частот выбираются из тех, которые определены физиками как оптимальные для научных исследований. Разрешающая способность и точность, которые могут быть достигнуты, определяются шириной полосы частот.

В программах исследования дальнего космоса требуется связь на огромные расстояния, поэтому сигналы, поступающие в приемник, очень слабы. Следовательно, приемники, используемые в программах исследования дальнего космоса, обладают высокой чувствительностью, что делает их весьма восприимчивыми к помехам, создаваемым нежелательными излучениями. Таким образом, чтобы избежать потенциальных помех, частоты, распределенные для исследования дальнего космоса, не должны распределяться для исследований околоземного космического пространства. Исключением являются межпланетные программы, в которых полеты выполняются по траекториям, проходящим как в околоземном пространстве, так и в дальнем космосе. Речь идет о пилотируемых полетах для исследования других планет, а также о программах, в которых предусмотрена доставка на Землю образцов породы с других планет. Оптимальным распределением частот для подобных программ космических исследований являются диапазоны 37 и 40 ГГц.

3.2 Соображения, касающиеся оборудования

Некоторые параметры оборудования, зависящие от частоты, непосредственно влияют на такие характеристики линии, как усиление антенны, эффективность и точность наведения. Другие параметры не оказывают прямого влияния на характеристики линии, однако их также необходимо учитывать при выборе частот. Для осуществления одновременной передачи и приема сигналов с использованием одной антенны парные полосы частот Земля-космос и космос-Земля должны отличаться на величину, равную 6–7% от высокой частоты для исследований околоземного пространства и 8–20% от высокой частоты для программ исследования дальнего космоса.

Размер антенны космического аппарата ограничивается такими факторами, как пространство и вес, технологическими разработками больших раскрывающихся антенн и способностью спутников нацеливать антенны с требуемой точностью. Частотный диапазон от 100 МГц до 1 ГГц целесообразно использовать для космических аппаратов, требующих ненаправленных антенн или антенн с широкой диаграммой направленности и узкой полосы пропускания, а также для земных станций простой конструкции, не оборудованных средствами управления положением антенны для целей слежения. В диапазоне частот 1–10 ГГц усиление антенн космических аппаратов соответствует требованиям по стабилизации пространственного положения и управлению лучом. В данном диапазоне может быть также соблюдена точность поверхности и наведения антенны, необходимая для крупных земных станций. Этот диапазон может также использоваться для широкополосных систем точного слежения и связи.

Наличие оборудования, пригодного для космического применения, может являться ограничивающим фактором при использовании более высоких частот. В настоящее время разработана наиболее совершенная аппаратура для космических исследований в диапазонах частот 2 ГГц и 7/8 ГГц, имеющих большое значение для формирования линий связи, устойчивых к погодным условиям. Это оборудование также эффективно и доступно для небольших проектов и программ с низкими требованиями к скорости передачи данных и ограниченным бюджетом. Совершенствуется аппаратура для распределений частот в диапазонах 27/32/34 ГГц, в которых реализуются преимущества более широких полос частот для аппаратов исследования околоземного пространства и дальнего космоса.

Антенны земных станций исследования дальнего космоса, как правило, представляют собой управляемые параболические антенны большого размера. Из-за огромной стоимости такие антенны изготавливаются редко. В результате для программ исследования дальнего космоса доступно лишь незначительное количество антенн большого размера с фиксированным диаметром.

3.3 Факторы, влияющие на распространение и излучение радиоволн

Линии электросвязи между земными станциями и спутниками для космических исследований всегда проходят через атмосферу Земли, в которой поглощение, осадки и рассеяние оказывают влияние на распространение радиосигналов и ограничивают использование некоторых полос частот. Осадки, в особенности дождь, являются причиной поглощения и рассеяния радиоволн, что может привести к значительному затуханию уровня сигнала. В диапазоне частот примерно до 100 ГГц при любых значениях интенсивности осадков погонное затухание быстро увеличивается. На более высоких частотах скорость затухания существенно не зависит от частоты. Для стран, расположенных в регионах с высокой интенсивностью осадков, критически важным аспектом является выбор подходящих частот, способных обеспечить высокое качество связи, несмотря на неблагоприятные погодные условия.

Молекулярное поглощение связано в основном с наличием в атмосфере водяного пара и кислорода. Газовые примеси при отсутствии водяного пара также могут способствовать значительному ослаблению волн на частотах выше примерно 70 ГГц. Линии поглощения водяного пара сосредоточены на частотах 22,235 ГГц, 183,3 ГГц и около 325 ГГц. Кислород имеет ряд линий поглощения в диапазоне от 53,5 до 65,2 ГГц, а также обособленную линию на частоте 118,74 ГГц. Вероятно, в будущем целесообразно будет использовать геостационарные ретрансляционные станции, работающие на частотах, которые относительно непрозрачны для передачи радиосигналов через атмосферу Земли, и вследствие этого ограничивающие помехи, создаваемые наземными станциями станциям-ретрансляторам и космическим аппаратам.

Шумовая температура неба, наблюдаемая антеннами земных станций, зависит от частоты, угла места антенны и атмосферных условий. На частотах выше примерно 4 ГГц выпадение осадков может привести к увеличению шумовой температуры неба, в несколько раз превышающей шумовую температуру

приемника. Шумовая температура неба, наблюдаемая космическим аппаратом, определяется главным образом небесными телами, такими как планеты и их спутники. Они образуют фон для большинства программ космических исследований. Солнце, у которого температура излучения абсолютно черного тела составляет 6000 К, значительно увеличивает шумовую температуру всей системы. По этой причине передачи сигналов, требующие наведения приемной антенны в точку на Солнце или вблизи него, как правило, не производятся. Значения температуры излучения абсолютно черного тела для планет и их спутников находятся в диапазоне приблизительно 50–700 К (для Земли эта величина равна 290 К). При выполнении околоземных программ Земля, как правило, находится в пределах главного лепестка антенны космического аппарата или антенны спутника DRS и влияет на общую шумовую температуру системы приема сигналов. Шумовая температура системы типового космического аппарата находится в диапазоне от 600 до 1500 К.

На частотах ниже 100 МГц варианты использования спектра для космических исследований, как правило, не рассматриваются, поскольку ионосферные явления, космический и промышленный шум затрудняют использование частот в данном диапазоне. В диапазоне от 100 МГц до 1 ГГц атмосферное поглощение невелико, и погодные условия оказывают незначительное влияние на распространение сигналов. Тем не менее фоновый шум относительно высок и возрастает по формуле $1/f^2$, следовательно, в данном диапазоне использование малошумящих приемников не дает существенного улучшения функциональных характеристик. В диапазоне частот от 1 до 10 ГГц влияние погодных условий крайне невелико, особенно у нижней границы диапазона, поэтому качество связи фактически не зависит от погодных условий. Уровни галактического и атмосферного шума достаточно низки, что позволяет использовать малошумящие приемники. В диапазоне от 10 до 275 ГГц сигналы, проходящие через атмосферу, подвержены значительному ослаблению. В первую очередь, это связано с осадками и поглощением в газах. Каждое из этих явлений может оказывать существенное влияние на качество связи на трассах Земля-космос.

В связи с огромной дальностью полетов, связанных с исследованием дальнего космоса, для калибровки воздействия заряженных частиц на скорость распространения требуется одновременное использование когерентных частот в двух или нескольких широко разнесенных полосах частот. Точность навигации зависит от определения положения и скорости космического аппарата путем измерения фазовых и групповых задержек принимаемых сигналов. На результаты этих измерений влияет скорость распространения радиоволн, которая зависит от наличия заряженных частиц вдоль трассы передачи сигналов. Воздействие заряженных частиц обратно пропорционально квадрату частоты, следовательно, для решения навигационных задач предпочтительно использовать более высокие частоты. Точность, необходимая для измерения групповой задержки, требует одновременного использования линий связи в двух (как минимум) отдельных полосах частот. При этом желательно, чтобы их частоты отличались по меньшей мере в 4 раза. Групповая задержка между линиями связи различается, и эта разница может использоваться при расчете подходящей поправки для задержки на каждой линии.

Для систем, работающих на частотах выше 200 ТГц, основными факторами, влияющими на прохождение сигналов через атмосферную трассу, являются рассеяние, рефракция и турбулентность атмосферы. Эти факторы могут стать причиной общего затухания сигнала, снижения когерентности волнового фронта, а также изменений направления передаваемого сигнала.

Более подробная информация о факторах, влияющих на распространение радиоволн через атмосферу Земли, а также сигналов частотой выше 20 ТГц, содержится в рекомендациях МСЭ-R серии Р по распространению радиоволн.

3.4 Соображения, касающиеся эксплуатационных характеристик линий связи

Важным условием выполнения космических программ является надежность линий связи. Критически важные этапы программы, в частности запуск и работа во внештатных ситуациях, в которых не может быть гарантирована ориентация космического аппарата, требуют высокой надежности линий связи. Надежность играет чрезвычайно важную роль для всех аспектов пилотируемых космических программ. Полосы частот в диапазоне 2 ГГц, распределенные службе космических исследований, обеспечивают надежную, независимую от погодных условий связь и используются для выполнения критически важных функций при выполнении программ космических исследований.

Определение полос частот, обеспечивающих наилучшие эксплуатационные показатели линий слежения и связи для космических исследований, основано на учете влияния частотно-зависимых параметров распространения и характеристик оборудования при анализе эксплуатационных показателей линий связи. Удобным показателем качества линии связи служит отношение мощности принимаемого сигнала к

спектральной плотности мощности шума (P_r/N_0). Справочные кривые, полученные на основе анализа эксплуатационных показателей линий связи, помогают определить диапазоны частот, обеспечивающие оптимальные характеристики для предполагаемых условий космических программ. Различные допущения, касающиеся дальности связи, характеристик антенн и мощности передатчика, влияют на абсолютные значения P_r/N_0 , но не изменяют формы кривых. Полоса частот, которая обеспечивает максимальное значение P_r/N_0 для конкретной системы и набора условий распространения радиоволн, определяется как предпочтительная полоса частот.

3.5 Распределения частот службе космических исследований

Распределение полос частот для космических исследований началось в 1959 году в Женеве на очередной Административной радиоконференции. Были произведены временные распределения для передачи сигналов между Землей и искусственными спутниками Земли в полосах частот 136–137 МГц и 2290–2300 МГц. В 1963 году на внеочередной Административной радиоконференции распределение двух указанных полос частот службе космических исследований частот было подтверждено и получило статус первичного распределения на равной основе с другими службами и на исключительной основе в Районе 2 МСЭ. За прошедшее время развитие космических технологий и связи, а также постоянно растущие требования к передаче информации привели к необходимости распределения дополнительных полос частот для удовлетворения возрастающих потребностей службы космических исследований.

Предпочтительные полосы частот для службы космических исследований приведены в следующих Отчетах и Рекомендациях МСЭ-R:

- Рекомендация МСЭ-R SA.363 "Системы космической эксплуатации. Частоты, значения ширины полосы и критерии защиты";
- Рекомендация МСЭ-R SA.364 "Предпочтительные частоты и значения ширины полосы для пилотируемых и беспилотных околоземных исследовательских спутников";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1019 "Предпочтительные полосы частот и направления передачи для спутниковых систем ретрансляции данных";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1344 "Предпочтительные полосы частот и значения ширины полосы для передачи данных космической VLBI";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1863 "Радиосвязь, используемая в чрезвычайных ситуациях и предназначенная для пилотируемых космических полетов";
- Отчет МСЭ-R SA.2177 "Selection of frequency bands in the 1–120 GHz range for deep-space research" (Выбор полос частот в диапазоне 1–120 ГГц для исследований дальнего космоса).

Полная таблица распределений частот службе космических исследований и соответствующие предельные значения п.п.м. приведены в Прилагаемом документе 2.

ГЛАВА 4

Критерии защиты службы космических исследований и соображения по совместному использованию частот

Совместное использование частот службой космических исследований и другими службами необходимо в тех случаях, когда полосы частот распределены одновременно нескольким службам. Взаимные помехи между системами можно уменьшить, определив условия совместного использования частот в результате анализа, проведенного для обеих служб. Для облегчения анализа помех, в случае если конкретные системные данные недоступны, определяются критерии защиты службы космических исследований.

4.1 Соображения, касающиеся помех при космических исследованиях

Помехи, создаваемые программам космических исследований, могут привести не только к сокращению, прерыванию или невозможности потери данных, но также и к потере возможности навигации и управления космическим аппаратом. Это происходит при потере сигналов управления на критически важных этапах программы, а также в случае прерывания потока телеметрической информации, передаваемой в реальном времени. Помехи в канале измерения дальности могут привести к ошибкам в системе навигации космического аппарата. Помехи, создаваемые научным экспериментам с использованием радиосвязи, даже спектральные шумы низкого уровня, изменяющие исследуемые радиосигналы, создают угрозу потери важной научной информации. Научные данные, подвергшиеся воздействию помех (в случае, если помеху можно обнаружить), как правило, отбрасываются. Более сложная ситуация возникает, если помеха не обнаруживается. При этом искаженные научные данные используются в исследованиях и считаются свободными от помех.

Во всех программах космических исследований совместно используется один и тот же набор радиочастот и полос частот, распределенных МСЭ. В связи с этим могут возникать ситуации, когда источником помех для той или иной программы являются другие программы. Помехи могут возникать в том случае, если земная станция принимает мешающий сигнал от космического аппарата, работающего в другой исследовательской программе и расположенного ближе к Земле. Другой вариант – когда космические аппараты, работающие в разных программах, находятся в пределах лучей передающих/принимающих земных станций или систем ретрансляции космос-космос. Период и уровень помехи задается конфигурацией ее орбитальной динамики. Если один или оба космических аппарата находятся сравнительно близко к земной станции, подвергающейся воздействию помех, то продолжительность помех может быть относительно небольшой. Однако если оба космических аппарата находятся относительно далеко друг от друга, например в программах исследования дальнего космоса, продолжительность воздействия помех может совпадать с длительностью передачи сигналов.

Оборудованием, наиболее чувствительным к помехам, являются контур слежения за несущей и квантовый предусилитель, которые используются при исследованиях дальнего космоса и во многих околоземных программах. В системах связи для космических исследований активно используются цепи фазовой автоподстройки частоты. Типовой приемник может быть оборудован несколькими синхронизированными цепями фазовой автоподстройки частоты, каждая из которых предназначена для захвата и отслеживания отдельного компонента сигнала. Наличие мощного сигнала помехи приводит к тому, что одна или несколько цепей теряют захват полезного сигнала и в результате связь обрывается. Такого рода помехи могут также стать причиной серьезных проблем в работе приемников, которым приходится восстанавливать или регенерировать несущие частоты из принимаемых сигналов. Помехи могут быть мгновенными, вызванными качанием частоты мешающего сигнала по полосе частот цепи, либо длиться в течение нескольких минут. В том случае если помехи вызывают потерю захвата несущей, может потребоваться несколько минут для повторного обнаружения и захвата полезного сигнала. Продолжительность потери захвата и последующего восстановления полезного сигнала может намного превышать продолжительность помех. Помехи, возникающие во время захвата сигнала в целях получения данных при полете в околоземном пространстве над земной станцией, могут привести к потере значительной части передаваемых сигналов.

Если мешающий сигнал достаточно мощный, то приемник может захватить его вместо полезного сигнала. При уровне мощности от слабого до умеренного помехи на фиксированной или качающейся частоте могут вызвать увеличение статической погрешности фазы и дрожание фазы контура слежения за несущей.

Чувствительность квантового предусилителя к помехам объясняется в основном наличием сильных сигналов вблизи полосы пропускания мазера или в области незанятых частот мазера. Сильные мешающие сигналы влияют на работу мазера, насыщая предусилитель и переводя один или несколько его компонентов в нелинейные режимы работы. Это приводит к сжатию динамического диапазона усиления и генерации гармоник, к появлению побочных сигналов, а также интермодуляционных составляющих.

Возможность появления вредных помех в результате нежелательных излучений является фактором, влияющим на работу всех служб. Одним из видов потенциально возможных вредных помех, представляющих особую проблему для космических излучателей на борту космических аппаратов, являются побочные излучения. Побочные излучения обусловлены гармониками сигнала, причиной которых являются интермодуляционные явления в передатчиках. Эти излучения вызывают особое беспокойство, так как под их воздействие могут попасть значительные участки спектра, а также потому, что регулировка или модификация передатчика после запуска космического аппарата, как правило, невозможны.

Следствием использования на космических аппаратах чувствительных приемников, особенно при исследованиях дальнего космоса, является их подверженность любому типу помех, возникающих в пределах или за пределами полос частот, распределенных для космических исследований. Излучатель, работающий в полосе частот, примыкающей к полосе, распределенной для космических исследований, может создавать в этой полосе помехи, уровни которых превышают критерии защиты. Для сокращения помех от внеполосных излучений могут использоваться защитные полосы и фильтрация передаваемого и принимаемого сигналов на границе полосы. Однако Регламент радиосвязи МСЭ, как правило, не содержит положений, касающихся защитных полос.

4.2 Критерии защиты для службы космических исследований

Критерии защиты для службы космических исследований подробно обосновываются в следующих рекомендациях МСЭ-R:

- Рекомендация МСЭ-R SA.363 "Системы космической эксплуатации. Частоты, значения ширины полосы и критерии защиты";
- Рекомендация МСЭ-R SA.609 "Критерии защиты для линий электросвязи пилотируемых и непилотируемых исследовательских спутников, работающих на околоземной орбите";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1155 "Критерии защиты, относящиеся к эксплуатации спутниковых систем ретрансляции данных";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1157 "Критерии защиты для исследования дальнего космоса";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1396 "Критерии защиты для службы космических исследований в полосах частот 37–38 и 40–40,5 ГГц";
- Рекомендация МСЭ-R SA.1743 "Максимально допустимое ухудшение линий радиосвязи служб космических исследований и космической эксплуатации, вызываемое помехами от излучений и радиации от других радиоисточников радиоволн".

К вышеуказанным Рекомендациям следует обращаться при проведении любых исследований помех и совместного использования частот.

4.3 Соображения, касающиеся совместного использования частот для служб космических исследований

Совместное использование частот службой космических исследований и другими службами является по ряду причин непростой задачей. Основная причина – это динамический характер помеховой обстановки. Перемещение космических аппаратов относительно друг друга и поверхности Земли приводит к постоянному изменению таких факторов, как сопряжение антенн и уровни мощности принимаемых сигналов. Относительные перемещения и последующие изменения в каналах связи варьируются в пределах от небольших до значительных величин и могут оказывать существенное влияние на уровень, продолжительность и вероятность возникновения помех.

Во-вторых, характеристики систем связи для исследования околоземного пространства и дальнего космоса меняются в широких пределах и зависят от ряда факторов, таких как требования к программам полетов, орбитальные характеристики, конструктивная сложность космических аппаратов и финансовые ограничения.

Для полетов в околоземном пространстве распределение и концентрация наземных источников излучения являются важным фактором с точки зрения образования помех и, в зависимости от высоты и орбитальных характеристик космического аппарата, может играть весьма заметную роль при совместном использовании частот. Из приведенных соображений следует, что условия возникновения помех и совместного использования частот, в том числе в программах космических исследований околоземного пространства, как правило, основываются на статистическом анализе, учитывающем динамику движущегося космического аппарата. Для точной оценки возможностей совместного использования полос частот с другими службами специалисты службы космических исследований в настоящее время используют современные компьютерные программы, способные обрабатывать множество переменных и характеристик связи.

В Рекомендации МСЭ-R SA.1016 рассматривается техническая возможность совместного использования частот станциями исследования дальнего космоса и станциями других служб.

Для определения сценария совместного использования частот в диапазоне 2 ГГц имеется целый ряд рекомендаций МСЭ-R. В Рекомендации МСЭ-R SA.1273 установлены максимальные предельные значения плотности потока мощности в полосе 2200–2290 МГц, создаваемой у поверхности Земли излучениями отдельной космической станции, работающей в направлении космос-Земля, включая линии связи спутников DRS с космическими аппаратами, работающими на низкой околоземной орбите. В сопутствующей Рекомендации МСЭ-R SA.1274 предлагается обеспечивать защиту линий связи спутников DRS с космическими аппаратами, находящимися на низкой околоземной орбите, за счет соблюдения суммарного уровня плотности мощности создаваемых помех. Положения по совместному использованию полос частот в диапазоне 2 ГГц каналами связи спутников DRS с космическими аппаратами на низкой околоземной орбите и системами подвижной связи обосновываются в Рекомендации МСЭ-R SA.1154. В Рекомендации МСЭ-R F.1248 приводятся практические предельные значения эффективной изотропно излучаемой мощности и спектральной плотности мощности, излучаемой станциями фиксированной службы в направлении спутников DRS, а в Рекомендации МСЭ-R SA.1275 определяются точки орбиты спутников DRS, которые должны быть защищены от излучений фиксированной службы в этом диапазоне частот.

Вероятность создания помех спутникам ГСО ФСС в полосе частот 25,25–27,5 ГГц космическими исследовательскими аппаратами на низкой околоземной орбите невелика, так как э.и.и.м. космического аппарата исследований космоса значительно ниже, чем э.и.и.м. передающих земных станций ФСС. Существует вероятность создания помех спутникам DRS земными станциями ФСС. Поскольку спутники DRS отслеживают перемещение космических аппаратов, связь между спутником DRS и антенной земной станции ФСС может привести к возникновению вредных помех в приемнике спутника DRS. Несмотря на относительно узкие лучи антенн на данной частоте в земных станциях, расположенных в пределах лимба Земли в зоне видимости спутника DRS, могут возникать помехи достаточно большой продолжительности. В Рекомендации МСЭ-R F.1249 приведены практические предельные значения э.и.и.м. и спектральной плотности мощности, излучаемой станциями фиксированной службы в направлении спутников DRS. В Рекомендации МСЭ-R SA.1276 определяются точки орбиты спутников DRS, которые должны быть защищены от помех.

В Рекомендации МСЭ-R SA.1862 содержатся руководящие указания по эффективному использованию полосы частот 25,5–27,0 ГГц, а в Рекомендации МСЭ-R SA.1626 рассматривается возможность совместного использования полосы частот 14,8–15,0 ГГц. В Рекомендации МСЭ-R SA.1810 содержатся руководящие указания по эксплуатации спутников исследования Земли, работающих в полосе частот 8025–8400 МГц, а в Рекомендации МСЭ-R SA.1629 рассматривается совместное использование линий управления в полосе частот 257–262 МГц.

4.3.1 Помехи, создаваемые земными станциями космических исследований

Помехи от земных станций службы космических исследований, создаваемые космическим аппаратам на негеостационарной орбите, имеют динамический характер и зависят от меняющихся во времени характеристик. К этим характеристикам относятся: время нахождения космического аппарата, испытывающего воздействие помех, в луче антенны земной станции; характеристики наведения передающей земной станции в процессе слежения и связи с космическим аппаратом для космических исследований; в случае применения на космическом аппарате, испытывающем воздействие помех, направленных антенн – характеристики их наведения. При определении продолжительности и уровня мощности помех, воздействию которых подвергается приемник космического аппарата, учитываются дополнительные факторы, такие как рабочая частота, тип антенны, ее размер, ширина луча и т. д.

Помехи работе наземных станций фиксированной и подвижной службы, создаваемые земными станциями космических исследований, регулируются положениями РР. В Статье 9 определяется процедура проведения координации с другими администрациями или получения их согласия, а в Статье 21 рассматриваются наземные и космические службы, совместно использующие полосы частот выше 1 ГГц. В Приложении 7 представляется метод определения координационной зоны вокруг земной станции в полосах частот между 100 МГц и 105 ГГц, используемых совместно космическими и наземными службами радиосвязи.

Надлежащий орбитальный разнос между спутниками на ГСО, узкая ширина луча и направления наведения антенны ослабляют любые помехи, возникающие между линиями связи Земля-космос спутников DRS и других спутников на ГСО. В Приложении 8 РР содержится метод расчета для определения необходимости координации между геостационарными спутниковыми сетями, совместно использующими одну и ту же полосу частот. В Статье 21 РР в целях защиты систем фиксированной и подвижной связи указывается ограничение уровней э.и.и.м. для земных станций, включая станции для систем DRS.

4.3.2 Помехи, создаваемые космическим аппаратам для исследования космоса

Космические аппараты для исследования космоса, работающие на низких околоземных орбитах, в большинстве случаев не подвергаются воздействию помех от спутников на ГСО, относящихся к фиксированной спутниковой или подвижной спутниковой службе. Причиной этого является меньшее расстояние между данным космическим аппаратом и его земной станцией по сравнению с гораздо большим расстоянием между этим космическим аппаратом и спутником на ГСО, а также более высокая э.и.и.м. земных станций космических исследований и направленность всех используемых антенн. Однако существует вероятность того, что такие космические аппараты будут подвергаться воздействию помех от спутниковых систем, работающих на негеостационарных орбитах и относящихся к фиксированной спутниковой или подвижной спутниковой службе. Космический аппарат для исследования космоса, работающий на средней околоземной орбите или выше и находящийся ближе к спутникам ГСО, может тем не менее подвергаться воздействию недопустимых помех, создаваемых спутниками фиксированной спутниковой и подвижной спутниковой служб. Количество передающих спутников и их близость могут стать совокупной причиной помех для рассматриваемого космического аппарата, принимающего радиосигналы.

Создание помех спутниками фиксированной спутниковой и подвижной спутниковой служб космическим аппаратам для исследования космоса, работающими далеко за пределами геосинхронной орбиты или в дальнем космосе, маловероятно.

Положения Статей 9 и 21 РР регулируют помехи, создаваемые земными станциями космическим аппаратам для исследования космоса. Существует некоторая вероятность создания помех системами фиксированной связи. При этом уровень помех должен быть минимальным, учитывая динамику помеховой обстановки, развертывание систем фиксированной связи и ограничения по наведению, применяемые к передающим земным станциям. Все более активное использование систем фиксированной

службы для применений в связи пункта со многим пунктами может оказывать значительное влияние на совместное со службой космических исследований использование частот.

4.3.3 Помехи, создаваемые космическими аппаратами для исследования космоса

Помехи, воздействующие на наземные станции, в большинстве случаев регулируются путем разработки соответствующих предельно допустимых значений плотности потока мощности, применимых к космическим аппаратам для исследования космоса. Предельные значения плотности потока мощности обосновываются в Статье 21 РР. В полосах 137–138 МГц, 143,6–143,65 МГц и 400,15–401 МГц нет ограничений для плотности потока мощности. Ненаправленные антенны таких космических аппаратов передают сигналы на приемные антенны земных станций, имеющие относительно большой размер и большее усиление по сравнению с антеннами, используемыми фиксированной и подвижной службами. Дифференциальное усиление соответствующих антенн и близость друг к другу передающих и приемных антенн фиксированной/подвижной службы сводит к минимуму вероятность возникновения помех во время любой передачи сигналов космических исследований, в особенности у лимба Земли.

Уровень и продолжительность помех, которым подвергаются земные станции метеорологической спутниковой службы, существенно снижены благодаря использованию больших антенн, соблюдению требований по слежению, а также благодаря пространственному размещению земных станций службы космических исследований и метеорологической спутниковой службы.

Благодаря сопряжению антенн по боковым лепесткам создание помех линиями связи космос-Земля спутников DRS линиям связи Земля-космос систем ГСО фиксированной спутниковой службы (ФСС) маловероятно. Геостационарные спутники ФСС, расположенные диаметрально противоположно спутникам DRS, также не будут подвергаться воздействию вредных помех ввиду значительного расстояния и особенностей связи между антеннами. Следствием таких факторов, как узкие лучи и сопряжение антенн, близкое расположение спутника подвижной связи к собственной передающей наземной станции, а также орбитальная динамика помеховой обстановки, являются незначительные вредные помехи либо полное отсутствие таких помех спутникам подвижной связи от линии связи космос-Земля спутников DRS.

Уровень помех, создаваемых линиями связи космос-Земля спутников DRS земным станциям ФСС, может быть снижен благодаря таким факторам, как надлежащее пространственное разнесение, сопряжение по боковым лепесткам больших антенн земных станций и поляризация. Координация, если таковая требуется, проводится согласно методу, приведенному в Приложении 8 РР. Динамика, связанная с требованиями к земным станциям подвижной спутниковой службы по слежению за космическими аппаратами, работающими на низкой околоземной орбите, также снижает помехи, создаваемые излучениями космос-Земля спутников DRS.

4.3.4 Помехи земным станциям службы космических исследований

Помехи земным станциям службы космических исследований, создаваемые подвижной спутниковой службой, работающей в полосе 137–138 МГц, координируются согласно Статье 9 РР. На частотах ниже 1 ГГц надлежащее развертывание и экранирование станций могут быть использованы для защиты мест расположения земных станций службы космических исследований и для сведения к минимуму необходимости координации с источниками излучений фиксированной и подвижной связи. На частотах выше 1 ГГц применяются положения Статьи 21 РР. В Приложении 7 РР приводится метод определения координационной зоны вокруг земной станции в полосах частот от 100 МГц до 105 ГГц, совместно используемых космическими и наземными службами радиосвязи.

Помехи, создаваемые спутниками подвижной связи, работающими на низкой околоземной орбите, могут воздействовать на линии связи космос-Земля спутников DRS ввиду их близости к поверхности Земли, плотности размещения систем и количества систем, которые потенциально могут работать в данной полосе частот. Существует вероятность создания помех станциями фиксированной и подвижной связи, если превышаются критерии защиты земных станций спутников DRS, приведенные в Рекомендации МСЭ-R SA.1155. В подобных случаях может оказаться необходимой координация согласно описанию, приведенному в Приложении 7 РР.

4.3.5 Предельные значения нежелательных излучений, установленные МСЭ

МСЭ-R определяет две отдельные области нежелательных излучений. Область внеполосных излучений находится непосредственно за пределами необходимой ширины полосы. Более удаленная область – это область побочных излучений. Пограничная область определяется в Рекомендации МСЭ-R SM.1539. Как правило, пограничная область составляет 250% от необходимой ширины полосы. Однако существует ряд исключений.

В п. 3.8 Регламента радиосвязи сказано, что в отношении внеполосных излучений передающие станции должны в максимально возможной степени соответствовать последним рекомендациям МСЭ-R. В Дополнении 5 к Рекомендации МСЭ-R SM.1541 определяется маска внеполосных излучений для космических служб. Однако на данный момент отсутствует маска внеполосных излучений, определенная МСЭ и применимая к космическим службам, эксплуатирующим линии космос-космос.

В соответствии с п. 3.7 Регламента радиосвязи передающие станции должны соблюдать максимально допустимые уровни мощности побочных излучений, определенные в Приложении 3 РР. Таблица II в Приложении 3 показывает, что для космических служб максимальное затухание сигнала в области побочных излучений составляет $43 + 10 \log P$, или 60 дБн в зависимости от того, какое из значений менее строгое. Значение P определяется как мощность (в ваттах), подаваемая на фидер антенны.

ПРИЛАГАЕМЫЙ ДОКУМЕНТ 1

**Рекомендации и отчеты МСЭ-R,
касающиеся службы космических исследований****Рекомендации МСЭ-R**

- SA.363 Системы космической эксплуатации. Частоты, значения ширины полосы и критерии защиты
- SA.364 Предпочтительные частоты и значения ширины полосы для пилотируемых и беспилотных околоземных исследовательских спутников
- SA.509 Эталонная диаграмма направленности излучения антенны земной станции службы космических исследований и радиоастрономической антенны, предназначенная для использования в расчетах помех, включая процедуры координации, для частот ниже 30 ГГц
- SA.510 Возможность совместного использования частот службой космических исследований и другими службами в полосах частот вблизи 14 и 15 ГГц – Потенциальная помеха от спутниковых систем ретрансляции данных
- SA.609 Критерии защиты для линий радиосвязи пилотируемых и непилотируемых исследовательских спутников, работающих на околоземной орбите
- SA.1014 Требования к электросвязи для пилотируемых и беспилотных исследований в дальнем космосе
- SA.1015 Требования к ширине полосы для исследования дальнего космоса
- SA.1016 Соображения по совместному использованию частот, касающиеся исследований дальнего космоса
- SA.1018 Гипотетическая эталонная структура для систем, включающих спутники ретрансляции данных на геостационарной орбите и космические аппараты пользователей на низких околоземных орбитах
- SA.1019 Предпочтительные полосы частот и направления передачи для спутниковых систем ретрансляции данных
- SA.1154 Условия защиты служб космических исследований (КИ), космической эксплуатации (КЭ) и спутниковых исследований Земли (СИЗ) и обеспечения совмещения с подвижной службой в полосах частот 2025–2110 МГц и 2200–2290 МГц
- SA.1155 Критерии защиты, относящиеся к эксплуатации спутниковых систем ретрансляции данных
- SA.1157 Критерии защиты для исследования дальнего космоса
- SA.1274 Критерии для спутниковых сетей ретрансляции данных в целях обеспечения совместного использования частот с системами фиксированной службы в полосах частот 2025–2110 МГц и 2200–2290 МГц
- SA.1275 Защита орбитальных местоположений спутников ретрансляции данных от излучений систем фиксированной службы, работающих в полосе частот 2200–2290 МГц
- SA.1276 Защита орбитальных местоположений спутников ретрансляции данных от излучений систем фиксированной службы, работающих в полосе частот 25,25–27,5 ГГц
- SA.1344 Предпочтительные полосы частот и значения ширины полосы для передачи данных космической VLBI в рамках существующих распределений служб космических исследований (СКИ)

- SA.1345 Методы прогнозирования диаграмм направленности излучения больших антенн, используемых для космических исследований и в радиоастрономии
- SA.1396 Критерии защиты для службы космических исследований в полосах частот 37–38 и 40–40,5 ГГц
- SA.1414 Характеристики спутниковых систем ретрансляции данных
- SA.1415 Совместное использование частот системами межспутниковой службы в полосе частот 25,25–27,5 ГГц
- RS.1449 Возможность совместного использования частот фиксированной спутниковой службой (ФСС) (космос-Земля) и спутниковой службой исследования Земли (пассивной) и службой космических исследований (пассивной) в полосе частот 18,6–18,8 ГГц
- SA.1626 Возможность совместного использования частот службой космических исследований (космос-Земля) и фиксированной и подвижной службами в полосе частот 14,8–15,35 ГГц
- SA.1629 Совместное использование частот линиями управления служб космических исследований и космической эксплуатации и фиксированной, подвижной и подвижной спутниковой службами в полосе частот 257–262 МГц
- SA.1742 Технические и эксплуатационные характеристики межпланетных систем и систем для исследования дальнего космоса, работающих в направлении космос-Земля на частотах около 283 ТГц
- SA.1743 Максимально допустимое ухудшение линий радиосвязи служб космических исследований и космической эксплуатации, вызываемое помехами от излучений и радиации от других радиоисточников
- SA.1805 Технические и эксплуатационные характеристики систем электросвязи, работающих в направлении космос-космос на частотах около 354 ТГц и 366 ТГц
- SA.1810 Руководящие принципы проектирования спутников спутниковой службы исследования Земли в полосе 8025–8400 МГц
- SA.1811 Эталонные диаграммы направленности антенн земных станций службы космических исследований с большой апертурой антенн, используемые для анализа совместимости, связанного с большим числом распределенных источников помех в полосах 31,8–32,3 ГГц и 37,0–38,0 ГГц
- SA.1862 Руководящие указания для эффективного использования полосы частот 25,5–27,0 ГГц спутниковой службой исследования Земли (космос-Земля) и службой космических исследований (космос-Земля)
- SA.1863 Радиосвязь, используемая в чрезвычайных ситуациях и предназначенная для пилотируемых космических полетов
- SA.1882 Технические и эксплуатационные характеристики систем службы космических исследований (Земля-космос) для использования в полосе 22,55–23,15 ГГц

Отчеты МСЭ-R

- SA.2065 Protection of the space VLBI telemetry link
(Защита телеметрической линии космической VLBI)
- SA.2066 Means of calculating low-orbit satellite visibility statistics
(Методы расчета статистических параметров видимости низкоорбитального спутника)
- SA.2067 Use of the 13.75 to 14.0 GHz band by the space research service and the fixed-satellite service
(Использование полосы 13,75–14,0 ГГц службой космических исследований и фиксированной спутниковой службой)
- SA.2098 Математические модели усиления антенн с большой апертурой земных станций службы космических исследований для изучения вопросов совместимости при наличии большого числа распределенных источников помех
- SA.2132 Telecommunication characteristics and requirements for space VLBI systems
(Характеристики электросвязи и требования для космических систем VLBI)
- SA.2162 Sharing conditions between space research service extra vehicular activities (EVA) links and fixed and mobile service links in the 410-420 MHz band
(Условия совместного использования частот линиями связи службы космических исследований для работы в открытом космосе (EVA) и линиями связи фиксированной и подвижной служб в полосе 410–420 МГц)
- SA.2166 Examples of radiation patterns of large antennas used for space research and radio astronomy
(Примеры диаграмм направленности излучения больших антенн, используемых для космических исследований и в радиоастрономии)
- SA.2167 Factors affecting the choice of frequency bands for space research service deep-space (space-to-Earth) telecommunication links
(Факторы, влияющие на выбор полос частот для линий электросвязи службы космических исследований в дальнем космосе (космос-Земля))
- SA.2177 Selection of frequency bands in the 1-120 GHz range for deep-space research
(Выбор полос частот в диапазоне 1–120 ГГц для исследований дальнего космоса)
- SA.2183 Method for calculating link performance in the space research service
(Метод расчета эксплуатационных показателей линии связи в службе космических исследований)
- SA.2190 Study on compatibility between the mobile service (aeronautical) and the space research service (space-to-Earth) in the frequency band 37-38 GHz
(Исследование совместимости подвижной службы (воздушной) и службы космических исследований (космос-Земля) в полосе частот 37–38 ГГц)
- SA.2191 Spectrum requirements for future SRS missions operating under a potential new SRS allocation in the band 22.55-23.15 GHz
(Потребности в спектре для будущих программ полетов в рамках СКИ, осуществляемых в соответствии с возможным новым распределением для СКИ в полосе 22,55–23,15 ГГц)
- SA.2192 Compatibility between the space research service (Earth-to-space) and the non-GSO-to-non-GSO systems on the inter-satellite service in the band 22.55-23.55 GHz
(Совместимость службы космических исследований (Земля-космос) и систем связи между негеостационарными спутниками межспутниковой службы в полосе 22,55–23,55 ГГц)
- SA.2193 Compatibility between the space research service (Earth-to-space) and the systems in the fixed, mobile and inter-satellite service in the band 22.55-23.15 GHz
(Совместимость службы космических исследований (Земля-космос) и систем фиксированной, подвижной и межспутниковой служб в полосе 22,55–23,15 ГГц)

ПРИЛАГАЕМЫЙ ДОКУМЕНТ 2

**Таблица использований СКИ
и соответствующие предельные значения п.п.м.**

Частота		Использование СКИ – не определено к-З – космос-Земля З-к – Земля-космос к-к – космос-космос дк – дальний космос	Предел плотности потока мощности при угле прихода (θ) относительно горизонтальной плоскости (дБВт/м ²) ⁽¹⁾			Эталонная ширина полосы частот
			$0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$	
2 501–2 502	кГц	СКИ				
5 003–5 005	кГц	СКИ				
10 003–10 005	кГц	СКИ				
15 005–15 010	кГц	СКИ				
18 052–18 068	кГц	СКИ				
19 990–19 995	кГц	СКИ				
25 005–25 010	кГц	СКИ				
30,005–30,01	МГц	СКИ				
39,986–40,02	МГц	СКИ				
40,98–41,015	МГц	СКИ				
137–138	МГц	к-З				
138–143,6	МГц	к-З				
143,6–143,65	МГц	к-З				
143,65–144	МГц	к-З				
400,15–401	МГц	к-З				
410–420	МГц	к-к				
1 215–1 300	МГц	Активное зондирование				
2 025–2 110	МГц	З-к, к-к	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 кГц
2 110–2 120	МГц	дк, З-к				
2 200–2 290	МГц	к-З, к-к	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 кГц
2 290–2 300	МГц	дк, к-З	-154	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-144	4 кГц
3 100–3 300	МГц	Активное зондирование				
5 250–5 570	МГц	СКИ				
5 650–5 670	МГц	дк				
5 670–5 725	МГц	дк	-152	$-154 + 0,5 (\theta - 5)$	-142	4 кГц
7 145–7 190	МГц	дк, З-к				
7 190–7 235	МГц	З-к				
8 400–8 450	МГц	дк, к-З	-150	$-150 + 0,5 (\theta - 5)$	-140	4 кГц
8 450–8 500	МГц	к-З	-150	$-150 + 0,5 (\theta - 5)$	-140	4 кГц
8 550–8 650	МГц	Активное зондирование				
9 300–9 800	МГц	Активное зондирование				
9 800–9 900	МГц	Активное зондирование				
12,75–13,25	ГГц	дк, к-З				
13,25–13,4	ГГц	Активное зондирование				
13,4–14,3	ГГц	Активное зондирование				
14,4–14,47	ГГц	к-З				
14,5–15,35	ГГц	СКИ				
16,6–17,1	ГГц	дк, З-к				

Частота		Использование СКИ – не определено к-З – космос-Земля З-к – Земля-космос к-к – космос-космос дк – дальний космос	Предел плотности потока мощности при угле прихода (θ) относительно горизонтальной плоскости (дБВт/м ²) ⁽¹⁾			Эталонная ширина полосы частот
			$0^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$	
17,2–17,3	ГГц	Активное зондирование				
22,55–23,55	ГГц	к-к	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 МГц
22,55–23,15	ГГц	З-к				
25,25–27,5	ГГц	к-к	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 МГц
25,5–27	ГГц	к-З	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 МГц
31–31,3	ГГц	СКИ	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 МГц
31,8–32,3	ГГц	дк, к-З	-120	$-120 + 0,75 (\theta - 5)$	-105	1 МГц
34,2–34,7	ГГц	дк, З-к				
34,7–35,2	ГГц	СКИ	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 МГц
35,5–36	ГГц	Активное зондирование				
37–38	ГГц	к-З, негеостационарная орбита	-120	$-120 + 0,75 (\theta - 5)$	-105	1 МГц
37–38 ⁽²⁾	ГГц	дк, к-З, негеостационарная орбита	-115	$-115 + 0,5 (\theta - 5)$	-105	1 МГц
37–38	ГГц	к-З, ГСО	-125	$-125 + (\theta - 5)$	-105	1 МГц
40–40,5	ГГц	З-к				
65–66	ГГц	СКИ				
74–84	ГГц	к-З				
94–94,1	ГГц	Активное зондирование				

⁽¹⁾ Пустая ячейка означает, что значение отсутствует.

⁽²⁾ Согласно примечанию **21.16.10** РР МСЭ это нестрогое предельное значение п.п.м. применяется на этапах запуска и работы в околоземном пространстве аппаратов для исследования дальнего космоса, которые являются составной частью негеостационарных систем СКИ.

Международный союз электросвязи
Отдел продаж и маркетинга
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Факс: +41 22 730 5194
Тел.: +41 22 730 6141
Эл. почта: sales@itu.int
Веб-сайт: www.itu.int/publications



Отпечатано в Швейцарии
Женева, 2015 г.

Фотографии представлены: Shutterstock