

Рекомендация МСЭ-R SA.1014-4 (12/2023)

Серия SA: Космические применения и метеорология

**Требования к радиосвязи для
пилотируемых и беспилотных
исследований в глубоком космосе**

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <https://www.itu.int/publ/R-REC/ru>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2025 г.

© ITU 2025

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R SA.1014-4

Требования к радиосвязи для пилотируемых и беспилотных исследований в глубоком космосе

(1994-2006-2011-2017-2023)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации кратко описаны некоторые основные характеристики радиосвязи службы космических исследований (глубокий космос). Такие характеристики влияют на требования к выбору возможных полос частот, координации, совместному использованию полос частот и защите от помех, а также обуславливают такие требования.

Ключевые слова

Глубокий космос, радиосвязь, телеметрия, телеуправление, скорость передачи данных, земные станции, космические станции, измерение дальности, радиотехника.

Соответствующие Рекомендации и Отчеты

Рекомендация МСЭ-R SA.1015, Отчет МСЭ-R SA.2167, Отчет МСЭ-R SA.2177.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что радиосвязь между Землей и станциями в глубоком космосе характеризуется уникальными требованиями;
- b) что эти требования влияют на выбор кандидатных полос частот, совместное использование полос частот, координацию, защиту от помех и другие регламентарные вопросы и вопросы управления использованием частот,

рекомендует

учитывать описанные в Приложении требования и характеристики для радиосвязи в глубоком космосе применительно к службе космических исследований (глубокий космос) и ее взаимодействию с другими службами.

Приложение

Требования к радиосвязи для пилотируемых и беспилотных исследований в глубоком космосе

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение.....	2
2	Требования к радиосвязи.....	2
2.1	Требования к телеметрии.....	3
2.2	Требования телеуправления.....	4
2.3	Требования слежения.....	4
2.4	Специальные требования для пилотируемых экспедиций в глубоком космосе ...	5
3	Технические характеристики	6
3.1	Местоположения и характеристики земных станций службы космической связи (глубокий космос).....	6
3.2	Космические станции.....	7
4	Методы радиосвязи в зоне глубокого космоса	8
4.1	Отслеживание несущей частоты и измерение доплеровского смещения.....	8
4.2	Модуляция и демодуляция.....	9
4.3	Кодирование	9
4.4	Мультиплексирование.....	9
4.5	Измерение дальности	9
4.6	Усиление антенны и ориентация	10
4.7	Дополнительные методы радионавигации	10
5	Анализ эффективности и расчетные пределы.....	11

1 Введение

В данном Приложении представлены некоторые характеристики экспедиций по исследованию глубокого космоса, функциональные и рабочие требования к радиосвязи, необходимой для проведения исследований глубокого космоса с помощью космического аппарата, а также технические методы и параметры систем, используемых в связи с такими экспедициями.

Соображения относительно характеристик полосы пропускания и требований представлены в Отчете МСЭ-R SA.2177.

2 Требования к радиосвязи

Экспедиции в глубокий космос требуют высоконадежной радиосвязи на более длительные периоды времени и при больших расстояниях. Например, экспедиция космического аппарата по сбору научной информации на планете Нептун занимает восемь лет и требует обеспечения радиосвязи на

расстоянии $4,65 \times 10^9$ км. Потребность в высокой э.и.и.м. и в очень чувствительных приемниках на земных станциях является результатом больших расстояний радиосвязи при исследовании глубокого космоса.

Непрерывное использование полос частот радиосвязи службы космических исследований (глубокий космос) – это следствие работы многих уже существующих экспедиций и других запланированных экспедиций. Поскольку большая часть экспедиций в глубокий космос продолжают в течение нескольких лет, а также обычно существует несколько экспедиций одновременно, имеется соответствующая потребность в радиосвязи с несколькими космическими аппаратами в любое заданное время.

Кроме того, каждая экспедиция может включать несколько космических аппаратов, поэтому необходима одновременная радиосвязь с несколькими космическими станциями. Может также потребоваться одновременная скоординированная радиосвязь между космической станцией и более чем одной земной станцией.

2.1 Требования к телеметрии

Телеметрия используется для передачи как эксплуатационной, так и научной информации из глубокого космоса.

Телеметрическая эксплуатационная информация о состоянии космического аппарата должна быть получена всякий раз, когда это необходимо, для обеспечения безопасности космического аппарата и успеха экспедиции. Это требует наличия не зависящей от метеоусловий линии радиосвязи достаточной пропускной способности. Такое требование частично определяет полосы частот, предпочтительные для исследований в глубоком космосе (см. Отчет МСЭ-R SA.2177).

Научная телеметрия включает посылку данных, которые собраны бортовыми научными приборами. Требуемая скорость передачи данных и приемлемый коэффициент ошибок могут быть весьма различны и зависеть от конкретного прибора и измерения. В таблицу 1 включены требуемые максимальные скорости передачи данных для научной и эксплуатационной телеметрии.

ТАБЛИЦА 1
Требуемые максимальные битовые скорости передачи данных
для исследований в глубоком космосе

Направление и функция	Характеристики линии связи			
	Единицы измерения	Погодная независимость	Обычная	Высокая скорость передачи
Земля-космос				
Телеуправление	бит/с	1 000	1 000	2 000
Программирование	кбит/с	50	100	200
Аудио	кбит/с	45	45	45
Видео	Мбит/с	4	12	30
Космос-Земля				
Эксплуатационная телеметрия	бит/с	500	500	2×10^5
Научные данные	кбит/с	115	500	3×10^5
Аудио	кбит/с	45	45	45
Видео	Мбит/с	0,8	8	30

Телеметрическая пропускная способность линии связи постоянно увеличивалась с развитием нового оборудования и технологий. Это увеличение может использоваться двумя способами:

- для сбора большего количества научных данных о данной планете или на данном расстоянии; и

— для осуществления эффективных экспедиций к более отдаленным планетам.

Для заданной телеметрической системы максимальная возможная скорость передачи данных обратно пропорциональна квадрату расстояния радиосвязи. Та же самая пропускная способность линии связи, которая обеспечивает скорость передачи данных 134 кбит/с вблизи планеты Юпитер ($9,3 \times 10^8$ км), обеспечила бы скорость передачи данных 1,74 Мбит/с вблизи планеты Венера ($2,58 \times 10^8$ км). Поскольку более высокие скорости передачи данных требуют более широкой полосы передачи, способность эффективно использовать максимальную телеметрическую возможность зависит от ширины распределенных полос частот и числа космических аппаратов экспедиции, которые одновременно находятся в пределах ширины диаграммы направленности земной станции и работают в той же самой полосе частот.

Важным вкладом в телеметрию было развитие методов кодирования, которые позволяют работать с более низким отношением сигнал/шум. Кодированный сигнал требует более широкой полосы передачи. Использование кодированной телеметрии на очень высоких скоростях передачи данных может быть ограничено шириной полосы распределения частот.

2.2 Требования телеуправления

Надежность является основным требованием к линии телеуправления. Команды должны быть получены точно и когда это необходимо. Обычно требуется, чтобы линия телеуправления имел коэффициент ошибок не более чем 1×10^{-6} . Команды должны быть получены успешно, без влияния ориентации космического аппарата, даже когда основное высокое усиление антенны может быть не направлено на Землю. Для таких обстоятельств требуется прием, использующий почти всенаправленную антенну космического аппарата. На земных станциях необходима очень высокая э.и.и.м. из-за низкого усиления антенны космического аппарата и для обеспечения высокой надежности.

При наличии на космическом аппарате компьютеров автоматическая последовательность и автоматический режим работы систем космического аппарата в значительной степени предопределены и хранятся на борту для более позднего выполнения. Для некоторых сложных последовательностей автоматический режим работы является обязательным. Возможность телеуправления требуется для чередования в полете хранимых команд, что может понадобиться для исправления наблюдаемых отклонений или сбоев режима космического аппарата. Это особенно справедливо для экспедиций большой продолжительности и для тех обстоятельств, где последовательность зависит от результатов более ранних событий на космическом аппарате. Например, команды для исправления траектории космического аппарата основаны на измерении траектории и не могут быть предопределены.

Диапазон требуемых скоростей передачи команд дается в таблице 1.

Надежное телеуправление включает потребность в надежной эксплуатационной телеметрии, которая используется для проверки того, что команды правильно получены и загружены в командную память.

2.3 Требования слежения

Слежение обеспечивает информацию, используемую для навигации космического аппарата и для изучения радиосвязи.

2.3.1 Навигация

Измерения траектории для навигации включают радиочастотный доплеровский сдвиг, время распространения двойного прохода сигнала измерения дальности и прием сигналов, подходящих для длиннобазовой интерферометрии. Измерения должны быть сделаны со степенью точности, которая удовлетворяет навигационным требованиям. На точность измерения воздействуют вариации в скорости распространения, знание местоположения станции, точность отсчета времени и задержка электронной схемы оборудования космической станции и земной станции. В таблице 2 представлен актуальный пример требований для точности навигации и связанных с этим измерений.

ТАБЛИЦА 2

Требования к навигации и слежению

Параметр	Значение
Навигационная точность (м)	300 (около Юпитера)
Доплеровская точность измерения (Гц)	$\pm 0,0005$
Точность измерения дальности (м)	$\pm 0,15$
Точность земного местоположения станции (м)	± 1
Частота следования элементарных посылок измерения дальности* (Земля-космос и космос-Земля)	
Не зависящая от метеоусловий (Мчип/с)	1
Обычная (Мчип/с)	10
Высокая (Мчип/с)	24

* Частота передаваемых или принимаемых импульсов кодовой последовательности псевдошума (ПШ), используемых для измерения дальности.

2.3.2 Радиотехника

Линии радиосвязи космических аппаратов могут также быть важны для изучения распространения радиоволн, теории относительности, астрономической механики и гравитации. Необходимую информацию обеспечивают измерения амплитуды, фазы, частоты, поляризации и задержки. Возможность делать эти измерения зависит от доступности соответствующих распределений частот. На частоте свыше 1 ГГц задержка на передачу сигналов и вращение Фарадея (влияние заряженных частиц и магнитного поля) быстро уменьшается с увеличением частоты и, таким образом, лучше изучена для более низких частот. Высокие частоты обеспечивают относительную свободу от такого воздействия и являются более подходящими для изучения теории относительности, гравитации и астрономической механики. Для такого изучения необходима калибровка влияния заряженных частиц на более низких частотах.

Для такой фундаментальной научной работы требуются измерения дальности с абсолютной точностью 1–2 см. Эта точность зависит от широкополосных кодов и одновременного использования множественных частот для калибровки влияния заряженных частиц.

2.4 Специальные требования для пилотируемых экспедиций в глубоком космосе

Функциональные требования для таких экспедиций будут аналогичны требованиям для беспилотных экспедиций. Однако присутствие человека в космическом аппарате ведет к дополнительным требованиям к надежности телеметрии, телеуправления и функций слежения. Учитывая необходимый уровень надежности, существенной разницей между пилотируемыми и беспилотными экспедициями будет использование аудио- и видеолиний для радиосвязи Земля-космос и космос-Земля. Скорости передачи данных для этих функций показаны в таблице 1.

В аспекте радиосвязи влияние этих дополнительных функций будет проявляться в требуемом расширении ширины полосы передачи для размещения видеосигналов. С учетом необходимой надежности связи и качества, необходимых для поддержания требуемых скоростей передачи данных, радиосвязь для пилотируемого и беспилотного исследований в глубоком космосе является подобной.

3 Технические характеристики

3.1 Местоположения и характеристики земных станций службы космической связи (глубокий космос)

В таблице 3 представлены местоположения земных станций с возможностью работы в пределах полос частот, распределенных для исследований в глубоком космосе.

ТАБЛИЦА 3

Местоположения земных станций службы космической связи (глубокий космос)

Администрация	Местоположение	Широта	Долгота
Китай	Каши	38° 55' с. ш.	75° 52' в. д.
	Цзямусы	46° 28' с. ш.	130° 26' в. д.
	Куньмин	25° 32' с. ш.	102° 48' в. д.
	Миюнь	40° 33' с. ш.	116° 58' в. д.
	Шанхай	31° 06' с. ш.	121° 12' в. д.
	Урумчи	43° 28' с. ш.	87° 11' в. д.
	Неукен (Аргентина)	39° 11' ю. ш.	69° 52' з. д.
Европейское космическое агентство	Себрерос (Испания)	40° 27' с. ш.	4° 22' з. д.
	Маларгуэ (Аргентина)	35° 46' ю. ш.	69° 22' з. д.
	Нью-Норсия (Австралия)	31° 20' ю. ш.	116° 11' в. д.
Германия	Вайльхайм	47° 53' с. ш.	11° 04' в. д.
Украина	Евпатория	45° 11' с. ш.	33° 11' в. д.
Россия	Медвежьи Озера	55° 52' с. ш.	37° 57' в. д.
	Уссурийск	44° 01' с. ш.	131° 45' в. д.
	Калязин	57° 13' с. ш.	37° 54' з. д.
Япония	Усидо, Нагано	36° 08' с. ш.	138° 22' в. д.
	Утиноура	31° 15' с. ш.	131° 04' в. д.
	Мисаса	36° 08' с. ш.	138° 21' в. д.
Соединенные Штаты Америки	Канберра (Австралия)	35° 28' ю. ш.	148° 59' в. д.
	Голдстоун, Калифорния	35° 22' с. ш.	115° 51' з. д.
	(Соединенные Штаты)		
	Мадрид (Испания)	40° 26' с. ш.	04° 17' з. д.
	Морхед, Кентукки	38° 11' с. ш.	83° 26' з. д.
	(Соединенные Штаты)		
Индия	Байалалью	12° 54' с. ш.	77° 22' в. д.
Объединенные Арабские Эмираты	Дубай	25° 14' с. ш.	55° 28' в. д.
Соединенное Королевство	Гунхилли	50° 03' с. ш.	5° 11' з. д.
Италия	Сардиния	39° 30' с. ш.	9° 15' в. д.

В каждом из этих местоположений имеется одна или более антенн, приемников и передатчиков, которые могут использоваться для линий связи службы космических исследований (глубокий космос) в одной или большем количестве распределенных полос частот. Основные параметры, которые характеризуют максимальную возможность одной или большего количества этих станций, перечислены в таблице 4. Хотя эти характеристики не применимы ко всем станциям, необходимо, чтобы распределение полос частот и критерии для защиты от помех были основаны на максимально возможной эффективности работы. Это требуется для обеспечения международных операций и защиты экспедиций службы космических исследований (глубокий космос).

ТАБЛИЦА 4

**Характеристики земных станций службы космических исследований (глубокий космос)
с антеннами размером 70 м**

Частота (ГГц)	Усиление антенны (дБи)	Ширина антенного лепестка (градусы)	Мощность передатчика (дБВт)	э.и.и.м. (дБВт)	Температура шума приемной системы (К)	Спектральная плотность мощности шума приемной системы (дБ(Вт/Гц))
2,110–2,120 Земля-космос	62	0,14	50 56 ⁽¹⁾	112 118 ⁽¹⁾	–	–
2,290–2,300 космос-Земля	63	0,13	–	–	25 ⁽²⁾ 21 ⁽³⁾	–214 ⁽²⁾ –215 ⁽³⁾
7,145–7,190 Земля-космос	72	0,04	49 ⁽⁴⁾	121 ⁽⁴⁾	–	–
8,400–8,450 космос-Земля	74	0,03	–	–	37 ⁽²⁾ 27 ⁽³⁾	–213 ⁽²⁾ –214 ⁽³⁾
31,8–32,3 космос-Земля	83,6	0,01	–	–	83 ⁽²⁾ 61 ⁽³⁾	–209 ⁽²⁾ –211 ⁽³⁾
34,2–34,7 Земля-космос	84	0,01	30	114	–	–

(1) Передатчик мощностью 56 дБВт, используемый только при критическом положении космического аппарата.

(2) Ясная погода, угол места 30°, дуплексный режим для одновременной передачи и приема.

(3) Ясная погода, угол места 30°, только прием.

(4) Некоторые земные станции продолжают использовать передатчики мощностью 20 кВт (43 дБВт).

Качество приема земных станций службы космических исследований (глубокий космос) обычно определяется в показателях отношения энергии сигнала к спектральной битовой шумовой плотности, требуемой для обеспечения заданной скорости передачи ошибочных битов. Другой способ показа высокой эффективности и чувствительности этих станций состоит в том, чтобы выразить коэффициент шумовой температуры антенны. Это соотношение обычно выражается как G/T и равно приблизительно 50 дБ/К при 2,3 ГГц, 59,5 дБ/К при 8,4 ГГц и 65,2 дБ/К при 32 ГГц. Эти значения можно сравнить с более низким и типовым значением 41 дБ/К некоторых земных станций фиксированных спутниковых служб.

3.2 Космические станции

Размер космического аппарата и его вес ограничены возможностью полезной нагрузки транспортного средства запуска. Мощность передатчика космической станции и размер антенны ограничены по сравнению с теми же параметрами на земных станциях. Шумовая температура приемника выше, поскольку используется неохлаждаемый предварительный усилитель.

Космическая станция имеет объединенный приемопередатчик, называемый ретранслятором, который работает в одном из двух режимов. В возвратном (называемом также двусторонним) режиме несущий сигнал, полученный от земной станции, используется для управления генератором в синфазном сигнальном электрическом контуре. В этом случае частота этого генератора используется для управления частотой передатчика приемопередатчика согласно постоянному коэффициенту. В одностороннем режиме частота передатчика космического аппарата управляется кварцевым генератором.

В двустороннем режиме частота и фаза передатчика космического аппарата управляются очень точно вследствие высокой точности и стабильности сигнала, полученного от земной станции.

В таблице 5 даны основные характеристики, которые являются типовыми для космических станций, предназначенных для исследований глубокого космоса.

ТАБЛИЦА 5

Типовые характеристики космических станций для исследования глубокого космоса

Частота линии связи Земля-космос (ГГц)	Диаметр антенны (м)	Усиление антенны (дБи)	Ширина лепестка антенны (градусы)	Шумовая температура приемника (К)	Спектральная плотность мощности шума приемника (дБ(Вт/Гц))
2,110–2,120	3,7	36	2,6	200	–206
7,145–7,190	3,7	48	0,64	330	–203
34,2–34,7	3,7	61	0,14	2 000	–196

Частота линии связи космос-Земля (ГГц)	Диаметр антенны (м)	Усиление антенны (дБи)	Ширина лепестка антенны (градусы)	Мощность передатчика (дБВт)	э.и.и.м. (дБВт)
2,290–2,300	3,7	37	2,3	13	50
8,400–8,450	3,7	48	0,64	13	61
31,8–32,3	3,7	59,5	0,17	13	72,5

Из-за ограниченной э.и.и.м. космических станций земная станция должна иметь приемник с наибольшей возможной чувствительностью. Приемники с более низкой чувствительностью могут использоваться на космических станциях вследствие высокой э.и.и.м. земной станции. Требования скорости передачи данных и рассмотрение размера, веса, стоимости, сложности и надежности определяют температуру шума приемника, необходимую для данного космического аппарата.

Мощность передатчика космической станции ограничена прежде всего электрической мощностью, которая может быть обеспечена космическим аппаратом.

4 Методы радиосвязи в зоне глубокого космоса

Телеметрия и функции телеуправления для радиосвязи в зоне глубокого космоса обычно осуществляются передачей фазово-модулированных несущих. Доплеровское смещение отслеживается фазовым когерентным детектированием принимаемой несущей. Добавляя зондирующий сигнал к модуляции, можно получить функцию зондирования.

4.1 Отслеживание несущей частоты и измерение доплеровского смещения

При приеме на Земле частота сигнала, переданного космическим аппаратом, изменяется эффектом Доплера. Средством, которое позволяет измерить доплеровское смещение и, следовательно, скорость космического аппарата относительно земной станции, является отслеживание фазы несущей. Приемники космической и земной станций отслеживают сигнал несущей с помощью фазовой автоподстройки частоты или петли Костаса. В двустороннем режиме приемопередатчика частота и фаза в цепи фазовой синхронизации космической станции используются, чтобы выделить одну или большее количество частот линии связи космос-Земля. Это позволяет передавать сигналы на земную станцию, которые являются коррелированными с частотой линии связи Земля-космос, что дает возможность сделать точные измерения доплеровского смещения.

В одностороннем режиме частоты линии связи космос-Земля определяются генератором в приемопередатчике, и доплеровское измерение основано на *априорном* знании частоты генератора.

4.2 Модуляция и демодуляция

Радиолинии используют фазовую модуляцию РЧ-несущей. Сигнал цифровых данных основной полосы частот используется, чтобы модулировать поднесущую, которая в свою очередь модулирует по фазе ВЧ-несущую. Прямоугольная поднесущая обычно используется для телеметрии; для дистанционного управления поднесущая часто синусоидальна. Коэффициент модуляции отрегулирован так, чтобы обеспечить желательное отношение остаточной мощности несущей к мощности на боковой полосе данных. Это отношение выбирается, чтобы обеспечить оптимальное отслеживание несущей и детектирование данных в приемнике.

Демодуляция РЧ-несущей и поднесущей данных выполнены цепями фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Обычно для детектирования данных используются методы корреляции и согласованной фильтрации.

Видео- и аудиолинии связи для пилотируемых экспедиций могут использовать другие методы модуляции и демодуляции. Обычно эффективные в отношении ширины полосы частот, модуляция и демодуляция типа КФМН и ГММН (офсетные) используются в этих случаях вместе с отслеживанием несущей с помощью петель Костаса вместо ФАПЧ.

4.3 Кодирование

В цифровой линии радиосвязи вероятность ошибки можно уменьшить при увеличении полосы частот информационной линии связи. Кодирование выполняет это увеличение, преобразовывая каждый информационный разряд в большое число кодовых знаков специфическим способом. Некоторые примеры кодирования типов – блочные и сверточные коды. После передачи первоначальные данные восстанавливаются с помощью процесса декодирования, который согласован с видом кода. Преимущество в качестве кодированной передачи связано с более широкой шириной полосы и может изменяться от 3,8 дБ (сверточное кодирование, коэффициент ошибок по символам 1×10^{-3}) до значений свыше 9 дБ (турбокодирование со скоростью 1/6).

4.4 Мультиплексирование

Научная и эксплуатационная телеметрия может быть объединена в один поток цифровых данных путем мультиплексирования с временным разделением или может передаваться на отдельных поднесущих, которые добавляются, чтобы обеспечить составной объект, модулирующий сигнал. Сигнал измерения дальности может также быть добавлен в сочетании с телеметрией или дистанционным управлением. Амплитуда различных сигналов данных отрегулирована так, чтобы соответствующим образом делить мощность передатчика между несущей и информационными боковыми полосами.

4.5 Измерение дальности

Измерение дальности проводится земной станцией с использованием приемоответчика космической станции в двустороннем режиме. Модуляция сигнала линии связи Земля-космос восстанавливается в ретрансляторе и используется для модуляции несущей линии связи космос-Земля. На земной станции сравнение переданных и полученных кодов измерения дает значение времени задержки передачи сигналов, которая пропорциональна расстоянию.

Фундаментальное ограничение точности измерения дальности – способность измерить корреляцию времени между переданными и полученными кодами. В настоящее время система использует самую высокую частоту кода, равную 2062 МГц. Кодовый период равняется 0,485 мкс и достигается реальная разрешающая способность 1 нс в предположении достаточного отношения сигнал/шум. Эта разрешающая способность эквивалентна 30 см в двусторонней длине пути или 15 см дальности. Это значение отвечает современным навигационным требованиям точности, приведенным в таблице 2.

Для точности 1 см, необходимой для научных экспериментов в области радио (см. пункт 2.3.2), требуется частота кода по крайней мере 30 МГц. Существующие системы измерения дальности на основе псевдошума (ПШ) глубокого космоса СКИ используют максимальную частоту следования элементарных посылок 24 Мчип/с.

4.6 Усиление антенны и ориентация

Для параболических антенн, обычно используемых в космических исследованиях, максимальное усиление ограничено точностью, с которой поверхность приближается к истинной форме параболической антенны. Это последнее ограничение налагает ограничение на максимальную частоту, которая может эффективно использоваться с конкретной антенной.

Одним из факторов точности поверхности, общим для земных антенн и антенн космической станции, является точность изготовления. Для антенн земной станции дополнительная поверхностная деформация вызывается ветром и тепловыми эффектами. При изменении угла места сила тяжести искажает поверхность в зависимости от жесткости несущей конструкции.

Для антенн космической станции размер ограничен допустимой массой, объемом, доступным в транспортном средстве запуска, и современным состоянием в конструировании несворачиваемых антенн. Тепловые эффекты вызывают искажение поверхностей антенн космической станции.

Максимальное пригодное для использования усиление антенн ограничено способностью их точной ориентации. Ширина луча должна адекватно учитывать угловую неопределенность ориентации. Все факторы, которые вызывают искажение поверхности рефлектора, также затрагивают точность наведения. Точность системы управления ориентацией космического аппарата (часто определяемой количеством топлива, которое имеется на борту) является фактором наведения антенны космической станции.

Точность, с которой известно местоположение Земли и космических станций относительно друг друга, влияет на минимальную пригодную для использования ширину луча и максимальное пригодное для использования усиление.

В таблице 6 показаны типовые пределы показателей качества антенн.

ТАБЛИЦА 6

Текущие ограничения на точность и максимальное усиление антенны

Ограничивающий параметр	Антенны космической станции		Антенны земной станции	
	Типовое максимальное значение параметра	Максимальное усиление	Типовое максимальное значение параметра	Максимальное усиление
Точность поверхности антенны	0,24 мм (среднеквадратическое), диаметр зеркала 3,7 м	61 дБи ⁽¹⁾ при 34 ГГц	0,53 мм (среднеквадратическое), диаметр зеркала 70 м	84 дБи ⁽¹⁾ при 34 ГГц
Точность наведения	$\pm 0,15^\circ$ (3 σ)	56 дБи ⁽²⁾	$\pm 0,005^\circ$ (3 σ)	82,5 дБи ⁽²⁾

⁽¹⁾ Усиление на других частотах будет меньше.

⁽²⁾ Усиление антенны на половинной мощности ширины луча равняется двукратной точности наведения. Ширина луча антенны с более высоким усилением будет слишком узкая относительно точности наведения.

4.7 Дополнительные методы радионавигации

Измерения эффекта Доплера и зондирование расстояния обеспечивают основную информацию, необходимую для навигации. Были разработаны дополнительные методы, чтобы расширить точность навигации.

4.7.1 Калибровка скорости распространения при воздействии заряженных частиц

На измерения дальности и эффекта Доплера влияет изменение скорости распространения радиоволны, вызванное действием электронов вдоль трассы передачи. Электроны распределены в пространстве и в планетных атмосферах с различной плотностью, и особенно их плотность велика около Солнца. Если это не учитывать, то вариации в скорости распространения могут давать ошибки при навигационных вычислениях.

Заряженные частицы вызывают увеличение фазовой скорости и уменьшение групповой скорости. Сравнивая изменение этих величин с усредненным эффектом Доплера в течение времени, можно определить влияние заряженных частиц.

Влияние на скорость распространения обратно пропорционально квадрату радиочастоты. Эта частотная зависимость может использоваться для дополнительной точности градуировки. Обратное зондирование и измерение эффекта Доплера могут быть выполнены одновременными сигналами линии связи космос-Земля в двух или нескольких отдельных полосах частот. Влияние заряженных частиц в отдельных полосах частот различается по величине, и эта разность используется, чтобы улучшить калибровку.

Влияние заряженных частиц на фазовую и групповую скорость, а также на измерение дальности описано в Отчете МСЭ-R SA.2177.

4.7.2 Интерферометрия со сверхбольшой базой (ИСББ)

Точность навигации космического аппарата зависит от точного знания местоположения земной станции относительно навигационной системы координат. Ошибка, равная 3 м, в принятом местоположении станции может приводить к ошибке 700 км в расчетной позиции космического аппарата на расстоянии Сатурна. ИСББ обеспечивает средства улучшения оценки местоположения станции путем использования астрономического источника радиоизлучения (квазара) как источника сигнала в фактически неизменяющейся точке на небесной сфере. Можно записывать сигналы квазара таким способом, чтобы определить с большой точностью разность во времени приема на двух далеко разнесенных станциях. При использовании нескольких из этих измерений местоположения станции могут быть определены с относительной погрешностью 10 см. В настоящее время для ИСББ используются частоты около 2, 8 и 32 ГГц.

Методика ИСББ также используется, чтобы прямо измерить угол склонения космического аппарата. Две точно расположенные земные станции, разделенные большим расстоянием с севера на юг, измеряют расстояние до космического аппарата. Затем склонение может быть рассчитано с большей точностью.

Третье приложение метода ИСББ (называемое DDOR) может использоваться для улучшения точности измерения углового положения космического аппарата. Две или больше земных станций поочередно наблюдают сигнал космического аппарата и сигнал квазара. Зная время, местоположение станции и учитывая влияние вращения Земли на полученные сигналы, можно определить угловое положение космического аппарата относительно астрономических объектов. После завершения разработки этих методов будет обеспечено 10-кратное повышение точности, достигаемой в настоящее время и равной 0,002 угловой секунды (эквивалентно 10 нрад). Более высокая точность позволит осуществлять более точную навигацию и, следовательно, более эффективный вывод на планетную орбиту.

5 Анализ эффективности и расчетные пределы

При проектировании, разработке и эксплуатации системы связи космических аппаратов используется понятие "энергетический потенциал линии связи" для представления номинальных значений мощности передатчика, мощности шума системы, коэффициентов усиления антенны, аппаратных потерь, потерь при распространении и других параметров связи в целях определения мощности сигнала и шума в приемнике и оценки запаса линии. Этот запас показывает надежность линии, а также ее устойчивость к изменениям параметров линии и помехам от других источников.

В таблице 7 показан пример энергетического потенциала линии связи космического аппарата "Вояджер" для телеметрии с высокой скоростью из района Юпитера. Энергетический потенциал линии связи может отличаться для других космических аппаратов и зависит от расстояния до Земли. Подобный анализ выполнен для дистанционного управления и измерения положения. Показанные ранее характеристики земной и космической станций были взяты за основу при вычислении запаса линии для отслеживания несущей и детектирования телеметрических данных.

ТАБЛИЦА 7

Энергетический потенциал линии связи "космический аппарат – Земля" из района Юпитера

Экспедиция "Вояджер" Юпитер/Сатурн 1977 года			
Режим: телеметрия, 115,2 кбит/с, кодирование 7, 1/2, несущая 8,45 ГГц			
Параметры передатчика			
Мощность РЧ (21 Вт)	(дБВт)		13,2
Потери в цепях	(дБ)		-0,2
Усиление антенны (3,7 м)	(дБи)		48,1
Потери на ориентацию	(дБ)		-0,2
Параметры трассы			
Потери в свободном пространстве между изотропными антеннами (8,45 ГГц, $9,3 \times 10^8$ км)	(дБ)		-290,4
Параметры приемника			
Усиление антенны (70 м, угол места 30°)	(дБи)		73,4
Потери на ориентацию	(дБ)		-0,3
Затухание, обусловленное погодными условиями	(дБ)		-0,1
Спектральная плотность мощности шума системы (T = 22,6 К)	(дБ(Вт/Гц))		-215,1
Общая суммарная мощность			
Потери в линии	(дБ)		-169,7
Принимаемая мощность	(дБВт)		-156,5
Характеристики эффективности отслеживания несущей (по обоим направлениям)			
Отношение мощности несущей к полной мощности	(дБ)		-15,4
Принимаемая мощность несущей	(дБВт)		-171,9
Ширина полосы шумов порога несущей	Гц		10
Мощность шума	(дБВт)		-205,1
Пороговое отношение сигнал/шум	(дБ)		20
Пороговая мощность несущей	(дБВт)		-185,1
Запас линии для отслеживания несущей	(дБ)		13,2
Характеристики эффективности детектирования данных			
Отношение мощности данных к полной мощности	(дБ)		-0,3
Потери приема и детектирования	(дБ)		-0,5
Полученная мощность данных	(дБВт)		-157,3
Ширина полосы шумов (эффективная ширина полосы шумов для детектирования данных согласованным фильтром со скоростью 115,2 кбит/с)	дБ(Гц)		50,6
Мощность шума	(дБВт)		-164,5
Пороговое отношение сигнал/шум (BER = 5×10^{-3} , кодирование 7, 1/2)	(дБ)		2,3
Пороговая мощность данных	(дБВт)		-162,2
Запас линии для детектирования данных	(дБ)		4,9

Наиболее важным пунктом в проектировании экспедиций в глубокий космос является относительно небольшой запас линии для детектирования данных (4,9 дБ в данном примере). Этот запас – следствие необходимости получения максимальной научной отдачи от каждого космического аппарата, и он становится меньше по мере увеличения расстояния. Для обеспечения линии связи из района Юпитера с запасом в 10 дБ необходимо снизить скорость передачи данных телеметрии со 115,2 кбит/с до 35,5 кбит/с. Риск использования системы с маленьким запасом линии состоит в ее чувствительности к вредным помехам, а для диапазонов свыше 2 ГГц – в уменьшенной надежности, вызванной влиянием погодных условий.