

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R SA.1014-2

(02/2011)

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

Серия SA

Космические применения и метеорология



Международный
союз
электросвязи

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 Приложении 1 к Резолюции 1 МСЭ-R. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://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: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

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	Подвижная спутниковая служба, спутниковая служба радиоопределения, любительская спутниковая 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 1 МСЭ-R.

Электронная публикация
Женева, 2011 г.

© ITU 2011

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.1014-2

Требования к электросвязи для пилотируемых и беспилотных исследований в глубоком космосе

(1994-2006-2011)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации кратко описываются некоторые основные характеристики электросвязи в глубоком космосе. Такие характеристики влияют на требования к выбору возможных полос частот, координации, совместному использованию полос частот и защите от помех, а также обуславливают такие требования.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что электросвязь между Землей и станциями в глубоком космосе имеет уникальные требования;
- b) что эти требования влияют на выбор возможных полос частот, совместное использование полос частот, координацию, защиту от помех и другие вопросы регулирования и управления использованием частот,

рекомендует,

1 чтобы требования и характеристики, описанные в Приложении 1 для электросвязи в глубоком космосе, учитывались при исследовании глубокого космоса и при взаимодействии с другими службами.

Приложение 1**Требования к электросвязи для пилотируемых и беспилотных исследований в глубоком космосе****1 Введение**

В данном Приложении представлены некоторые характеристики экспедиций по исследованию глубокого космоса, функциональные и рабочие требования к электросвязи, необходимой для проведения исследований глубокого космоса с помощью космического корабля, 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 электросвязи

Экспедиции в глубокий космос требуют высоконадежной радиосвязи на более длительные периоды времени и при больших расстояниях. Например, экспедиция космического корабля по сбору научной информации на планете Нептун занимает восемь лет и требует электросвязи 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 в глубоком космосе – это следствие работы нескольких уже существующих экспедиций и других запланированных экспедиций. Поскольку многие экспедиции в глубокий космос продолжаются в течение нескольких лет, а также обычно существуют несколько экспедиций одновременно, имеется соответствующая потребность в радиосвязи с несколькими космическими кораблями в любое заданное время.

Кроме того, каждая экспедиция может включать больше чем один космический корабль, 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.

Эксплуатационная телеметрическая информация относительно состояния космического корабля должна быть получена всякий раз, когда это необходимо, для обеспечения безопасности космического корабля и успеха экспедиции. Это требует погодной независимости канала связи передачи данных 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 типичные диапазоны скоростей передачи данных для научной и эксплуатационной телеметрии.

ТАБЛИЦА 1

Требуемые битовые скорости передачи для исследований в глубоком космосе

Направление и функция	Характеристика канала связи		
	Погодная независимость	Обычная	Высокая скорость передачи
Земля-космос			
Телеуправление (бит/с)	1–1 000	1–1 000	1–2 000
Программирование (кбит/с)	1–50	1–100	1–200
Звук (кбит/с)	45	45	45
Телевидение (Мбит/с)	1–4	0,2–12	6–100
Измерение дальности (Мбит/с)	1	10	100
Космос-Земля			
Эксплуатационная телеметрия (бит/с)	8–500	8–500	$8-2 \times 10^5$
Научные данные (кбит/с)	0,008–115	1–500	$40-3 \times 10^5$
Звук (кбит/с)	45	45	45
Телевидение (Мбит/с)	0,2–0,8	0,2–8	6–1 000
Измерение дальности (Мбит/с)	1	10	100

Телеметрическая пропускная способность 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 канала 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 ширины полосы передачи, способность эффективно использовать максимальную телеметрическую возможность зависит от ширины распределенных полос частот и числа космических кораблей 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 каналу телеуправления. Команды должны быть получены точно и когда это необходимо. Обычно требуется, чтобы канал телеуправления имел коэффициент ошибок не более чем 1×10^{-6} . Команды должны быть получены успешно, без влияния ориентации космического корабля, даже когда основное высокое усиление антенны может быть направлено не на Землю. Для таких обстоятельств требуется прием, использующий почти всенаправленную антенну космического корабля. На земных станциях необходима очень высокая э.и.и.м. из-за низкого усиления антенны космического корабля и для обеспечения высокой надежности.

При наличии на космическом корабле компьютеров, автоматическая последовательность и автоматический режим работы систем космического корабля в значительной степени predeterminedены 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 корабля. Это особенно справедливо для экспедиций большой продолжительности и для тех обстоятельств, где последовательность зависит от результатов более ранних событий на космическом корабле. Например, команды для исправления траектории космического корабля основаны на измерении траектории и не могут быть predeterminedены.

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 корабля и для изучения радиосвязи.

2.3.1 Навигация

Измерения траектории для навигации включают радиочастотный доплеровский сдвиг, время распространения двойного прохода сигнала измерения 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

Навигация и требования к точности слежения

Параметр	Значение
Навигационная точность (м)	300 (около Юпитера)
Допплеровская точность измерения (Гц)	$\pm 0,0005$
Точность измерения дальности (м)	$\pm 0,15$
Точность земного местоположения станции (м)	± 1

2.3.2 Наука о радиосвязи

Каналы электросвязи космических кораблей 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 корабле ведет к дополнительным требованиям к надежности телеметрии, телеуправления и функций слежения. Учитывая необходимый уровень надежности, существенной разницей между пилотируемыми и беспилотными экспедициями будет использование звуковых и телевизионных каналов связи для радиосвязи космос-Земля и Земля-космос. Скорости передачи данных для этих функций показаны в таблице 1.

С точки зрения электросвязи 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, электросвязь для пилотируемого и беспилотного исследований в глубоком космосе является подобной.

3 Технические характеристики**3.1 Местоположения и характеристики земных станций дальней космической связи**

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 дальней космической связи

Администрация	Местоположение	Широта	Долгота
Китай	Каши Цзямусы	38° 55' с. ш. 46° 28' с. ш.	75° 52' в. д. 130° 26' в. д.
Европейское космическое агентство	Себрерос (Испания)	40° 27' с. ш.	4° 22' з. д.
	Маларгу (Аргентина)	35° 46' с. ш.	69° 22' в. 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.
Япония	Усидо, Нагано	36° 08' с. ш.	138° 22' в. д.
Соединенные Штаты Америки	Канберра (Австралия)	35° 28' ю. ш.	148° 59' в. д.
	Голдстоун, Калифорния (Соединенные Штаты Америки)	35° 22' с. ш.	115° 51' з. д.
	Мадрид (Испания)	40° 26' с. ш.	04° 17' з. д.

В каждом из этих местоположений имеется одна или более антенн, приемников и передатчиков, которые могут использоваться для дальних космических связей в одном 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 в глубоком космосе.

ТАБЛИЦА 4

Характеристики земных станций дальней космической связи с антеннами в 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	43	115	–	–
8,400–8,450 Космос-Земля	74	0,03	–	–	37 ⁽²⁾ 27 ⁽³⁾	–213 ⁽²⁾ –214 ⁽³⁾
31,832,3 Космос-Земля	83,6 ⁽⁴⁾	0,01 ⁽⁴⁾	–	–	83 ⁽²⁾⁽⁴⁾ 61 ⁽³⁾⁽⁴⁾	–209 ⁽²⁾⁽⁴⁾ –211 ⁽³⁾⁽⁴⁾
34,2–34,7 Земля-космос	84 ⁽⁴⁾	0,01 ⁽⁴⁾	Должна быть определена	Должна быть определена	–	–

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

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

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

(4) Оценка.

Качество приема земных станций дальней космической связи 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 и 59,5 дБ(К) при 8,4 ГГц. Эти значения можно сравнить с более низким и типичным значением 41 дБ(К) некоторых земных станций фиксированных спутниковых служб.

3.2 Космические станции

Размер космического корабля 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 никакой сигнал не принимается от земной станции, а частота передатчика космического корабля управляется кварцевым генератором.

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

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

ТАБЛИЦА 5

Типичные характеристики космических станций для исследования глубоко космоса

Частота канала космос-Земля (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 канала 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 корабля.

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

4 Методы электросвязи в зоне глубокого космоса

Телеметрия и функции телеуправления для электросвязи в зоне глубокого космоса обычно осуществляются передачей фазово-модулированных несущих. Допплеровское 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 кораблем, изменяется эффектом Доплера. Средством, которое позволяет измерить доплеровское смещение и, следовательно, скорость космического корабля 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 используется, чтобы выделить одну или большее количество частот канала космос-Земля. Это позволяет передавать сигналы на земную станцию, которые являются коррелированными с частотой канала Земля-космос, что дает возможность сделать точные измерения доплеровского смещения.

В одностороннем режиме частоты канала 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 согласованного фильтра.

Телевидение и звуковые каналы 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 электросвязи вероятность ошибки можно уменьшить при увеличении полосы частот информационного канала. 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 расстояния 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 расстояния

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

Фундаментальное ограничение точности измерения расстояния – 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 4 нс в предположении достаточного отношения сигнал/шум. Эта разрешающая способность эквивалентна 120 см в двусторонней длине пути, или 60 см дальности. Это значение отвечает современным навигационным требованиям точности, приведенным в таблице 2.

Для точности 1 см, необходимой для будущих научных экспериментов в области радио (см. п. 2.3.2), требуется частота кода по крайней мере 30 МГц.

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 корабля (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 типичные пределы показателей качества антенн.

ТАБЛИЦА 6

Текущие ограничения на точность и максимальное усиление антенны

Ограничивающий параметр	Антенны космической станции		Антенны земной станции	
	Типичное максимальное значение параметра	Максимальное усиление	Типичное максимальное значение параметра	Максимальное усиление
Точность поверхности антенны	0,24 мм (среднеквадратическое), диаметр зеркала 3,7 м	66 дБи ⁽¹⁾ при 100 ГГц	0,53 мм (среднеквадратическое), диаметр зеркала 70 м	83 дБи ⁽¹⁾ при 37 ГГц
Точность наведения	±0,15° (3σ)	55 дБи ⁽²⁾	±0,005° (3σ)	75 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 канала 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 измерение дальности описывается в Отчете МСЭ-R SA.2177.

4.7.2 Интерферометрия со сверхбольшой базой (ИСББ)

Точность навигации космического корабля 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 корабля на расстоянии Сатурна. ИСББ обеспечивает средства улучшения оценки местоположения станции путем использования астрономического источника радиоизлучения (квара) 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 и 8 ГГц.

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

Третье приложение метода ИСББ может использоваться для улучшения точности измерения углового положения космического корабля. Две или больше земных станций поочередно наблюдают сигнал космического корабля и сигнал квазара. Зная время, местоположение станции и учитывая влияние вращения Земли на полученные сигналы, можно определить угловое положение космического корабля относительно астрономических объектов. После завершения разработки этих методов будет обеспечено существенное повышение точности, достигаемой в настоящее время и равной 0,01 угловой секунды. Более высокая точность позволит осуществлять более точную навигацию.

5 Анализ эффективности и расчетные пределы

В таблице 7 показан ресурс связи, используемый для анализа эффективности. Данный пример – для телеметрии с высокой скоростью из района Юпитера. Подобный анализ выполнен для дистанционного управления и измерения положения. Показанные ранее характеристики земной и космической станций используются как основа для вычисления запаса по характеристикам для каждой функции электросвязи.

ТАБЛИЦА 7

Ресурс эффективности электросвязи "космический корабль-Земля" из района Юпитера

Экспедиция: "Вояджер" Юпитер/Сатурн 1977 г.	
Режим: Телеметрия, 115,2 кбит/с, кодированная несущая 8,45 ГГц	
Параметры передатчика Мощность РЧ (21 Вт) (дБВт) Потери в цепях (дБ) Усиление антенны (3,7 м) (дБи) Потери на ориентацию (дБ)	13,2 -0,2 48,1 -0,2
Параметры трассы Потери в свободном пространстве между изотропными антеннами (дБ) (8,45 ГГц, $9,3 \times 10^8$ км)	-290,4
Параметры приемника Усиление антенны (64 м, угол места 30°) (дБи) Потери на ориентацию (дБ) Затухание, обусловленное погодными условиями (дБ) Спектральная плотность мощности шума системы (22,6 К) (дБ(Вт/Гц))	72,0 -0,3 -0,1 -215,1
Общая суммарная мощность Потери в линии (дБ) Принимаемая мощность $P(T)$ (дБВт)	-171,1 -157,9
Характеристики эффективности отслеживания несущей (по обоим направлениям) Мощность несущей/полная мощность (дБ) Принимаемая мощность несущей (дБВт) Ширина полосы шумов порога несущей ($B = 10$ Гц) ($10 \log B$) Мощность шума (дБВт) Пороговое отношение сигнал/шум (дБ) Пороговая мощность несущей (дБВт) Запас по требуемым характеристикам (дБ)	-15,4 -173,3 10,0 -205,1 20 -185,1 11,8
Характеристики эффективности выделения данных Мощность данных/полная мощность (дБ) Потери приема и выделения данных (дБ) Полученная мощность данных (дБВт) Ширина полосы шумов (эффективная ширина полосы шумов для выделения данных согласованным фильтром со скоростью 115,2 кбит/с) (дБ) Мощность шума (дБВт) Пороговое отношение сигнал/шум (частота передачи ошибочных битов равна 5×10^{-3}) (дБ) Пороговая мощность данных (дБВт) Запас по требуемым характеристикам (дБ)	-0,3 -0,5 -158,7 50,6 -164,5 2,3 -162,2 3,5

Наиболее важным пунктом в проектировании экспедиций в глубокий космос является весьма небольшой запас по требуемым телеметрическим характеристикам (3,5 дБ в данном примере). Этот маленький запас – следствие необходимости получения максимальной научной отдачи от каждого космического корабля. Проектирование с увеличенным на 10 дБ запасом прочности уменьшило бы объем данных телеметрии на порядок. Риск использования системы с маленьким запасом по требуемым характеристикам состоит в ее чувствительности к вредным помехам, а для диапазонов свыше 2 ГГц – в уменьшенной надежности, вызванной влиянием погодных условий.