

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R F.1249-4

(09/2015)

**Технические и эксплуатационные
требования, способствующие
совместному использованию частот
системами связи пункта с пунктом
в фиксированной службе
и межспутниковой службе
в полосе 25,25–27,5 ГГц**

**Серия F
Фиксированная служба**



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-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Приложении 1 к Резолюции МСЭ-R 1. 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-Т/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	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, 2017 г.

© ITU 2017

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 F.1249-4*

**Технические и эксплуатационные требования, способствующие
совместному использованию частот системами связи пункта
с пунктом в фиксированной службе и межспутниковой службе
в полосе 25,25–27,5 ГГц**

(Вопрос МСЭ-R 118/7)

(1997-2000-2009-2013-2015)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводится максимальная плотность э.и.и.м. передающих станций связи пункта с пунктом фиксированной службы (ФС) в направлении геостационарной спутниковой орбиты для обеспечения возможности совместного использования частот с межспутниковой службой в полосе 25,25–27,5 ГГц. В настоящей Рекомендации эталонная плотность э.и.и.м. учитывает необходимость передачи на минимально требуемом уровне, в то же время принимая во внимание использование автоматического регулирования мощности передачи (АРМП) на станциях ФС в случаях появления осадков.

Ключевые слова

Спутники ретрансляции данных, местоположения на орбите, э.и.и.м., спектральная плотность

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что полоса частот 25,25–27,5 ГГц распределена межспутниковой службе и фиксированной службе на первичной основе;
- b) что эта полоса частот используется в службе космических исследований и в спутниковой службе исследования Земли для обратных межспутниковых линий связи со спутниками ретрансляции данных (СРД) на геостационарной спутниковой орбите (ГСО);
- c) что в некоторых передающих станциях фиксированной службы (ФС) может быть использовано автоматическое регулирование мощностью передачи (АРМП) для уменьшения их эквивалентной изотропно излучаемой мощности (э.и.и.м.) в условиях ясной погоды;
- d) что суммарная помеха от боковых лепестков антенн большого количества передающих станций ФС, которые не направлены на СРД, будет допустимой, но что связь с главным лучом одиночной передающей станции ФС, который направлен на СРД, как считается, может создать возможную серьезную ситуацию помех (см. Приложение 1);
- e) что, в то время как для эксплуатации сверхпротяженных линий ФС требуются повышенные значения плотности э.и.и.м., эти линии обычно работают при нулевых углах места или вблизи них, при которых ослабление в атмосфере существенно уменьшает возможные помехи;
- f) что при определенных обстоятельствах топография и искусственные структуры мешают излучению ФС в сторону космического пространства или вносят существенное ослабление на трассе распространения возможных помех;
- g) что для ослабления помех от излучений систем ФС в направлении систем СРД в обеих службах могут применяться методы сведения помех к минимуму,

* Настоящая Рекомендация была разработана совместно 7-й и 5-й Исследовательскими комиссиями по радиосвязи, и будущие пересмотры должны осуществляться совместно.

признавая,

a) что в Рекомендации МСЭ-R SA.1155 рекомендуется, чтобы максимальные уровни суммарной спектральной плотности мощности помех, принимаемых в полосе 25,25–27,5 ГГц геостационарными СРД в межспутниковой службе, не превышали -178 дБ(Вт/кГц) для более чем 0,1% времени;

b) что на ГСО используется ограниченное количество сетей СРД, перечисленных в Рекомендации МСЭ-R SA.1276 (см. Примечание 1);

c) что в Рекомендации МСЭ-R F.758 представлено большое число параметров систем фиксированной беспроводной связи, обобщенных на основе репрезентативных систем для конкретных диапазонов частот,

рекомендует,

1 чтобы максимальный уровень э.и.и.м. в пределах ширины полосы канала такой станции ФС был, когда это практически возможно, минимально необходимым для удовлетворительной работы;

2 чтобы в отношении местоположений на ГСО, указанных в Рекомендации МСЭ-R SA.1276 (см. Примечание 1), выполнялось следующее:

2.1 плотность э.и.и.м. такой станции ФС в направлении вышеуказанных местоположений, насколько это практически возможно, не превышала $+24$ дБВт в любой полосе шириной 1 МГц (см. Примечание 2);

2.2 в условиях, когда на участке между передающей и приемной станциями ФС происходит ослабление сигнала из-за осадков, на передающей станции можно было использовать АРМП для повышения ее мощности передачи на величину, не превышающую уровня ослабления из-за осадков, так чтобы плотность ее э.и.и.м. в направлении местоположений на ГСО, указанных выше, не превышала $+33$ дБВт в любой полосе шириной 1 МГц;

2.3 если ослабление сигнала в атмосфере в направлении на вышеуказанные местоположения на ГСО, рассчитанное с применением процедур, изложенных в Приложении 1 к Рекомендации МСЭ-R P.676, и с учетом угла места в направлении на эти местоположения на орбите, высоты передающей антенны ФС и информации о местном среднем уровне содержания водяных паров в самый сухой месяц года и о других метеорологических параметрах (см. Примечание 3), превышает 3 дБ, то такое превышение может применяться как увеличение плотности э.и.и.м. станции ФС;

2.4 если зоны Френеля на трассе от такой передающей станции ФС в направлении вышеуказанных местоположений на орбите полностью или частично затенены, то плотность э.и.и.м. в этом направлении может быть увеличена на величину, рассчитанную с использованием методов, изложенных в Рекомендации МСЭ-R P.526, при надлежащем учете атмосферной рефракции на данной трассе (см. Рекомендацию МСЭ-R F.1333);

2.5 в Приложении 2 описывается метод, который может использоваться для расчета углов разноса относительно конкретных местоположений на ГСО;

3 что для всех других местоположений на ГСО:

3.1 плотность э.и.и.м. такой станции ФС в направлении на ГСО не должна превышать $+33$ дБВт в любой полосе шириной 1 МГц;

3.2 в Приложении 2 к Рекомендации МСЭ-R SF.765 описывается метод, который может использоваться для расчета углов разноса относительно ГСО (см. Примечание 4);

4 четыре Примечания 1, 2, 3 и 4, ниже, являются частью настоящей Рекомендации:

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В Рекомендации МСЭ-R SA.1276-4 указаны следующие позиции на геостационарной орбите:

10,6° в. д., 16,4° в. д., 16,8° в. д., 21,5° в. д., 47° в. д., 59° в. д., 77° в. д., 80° в. д., 85° в. д., 89° в. д., 90,75° в. д., 95° в. д., 113° в. д., 121° в. д., 133° в. д., 160° в. д., 167° в. д., 171° в. д., 176,8° в. д., 177,5° в. д., 12° з. д., 16° з. д., 32° з. д., 41° з. д., 44° з. д., 46° з. д., 49° з. д., 62° з. д., 139° з. д., 160° з. д., 164,2° з. д., 167,5° з. д., 170° з. д., 171° з. д., 174° з. д.

При пересмотре Рекомендации МСЭ-R SA.1276 в целях добавления новых местоположений СРД на орбите, защита космических станций в этих новых орбитальных слотах в пересмотре данной Рекомендации применяется только к станциям ФС, установленным после даты вступления в силу пересмотренной Рекомендации МСЭ-R SA.1276.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Возможные помехи спутникам СРД со стороны фиксированных систем беспроводной связи пункта с пунктом, превышающие предельные уровни плотности э.и.и.м., указанные в п. 2.1 раздела *рекомендует*, можно уменьшить путем недопущения использования центральных частот СРД, если это возможно. Требуется дальнейшее изучение этого метода ослабления помех.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – В Рекомендации МСЭ-R F.1404 предлагается оценка уровня ослабления в атмосфере с использованием подробной информации о местных метеорологических параметрах в полосе 25,25–27,5 ГГц. В тех случаях, когда такая информация отсутствует, на временной основе предлагается простая процедура, которая предполагает применение упрощенных климатических моделей. Данный метод требует дальнейшего изучения. Администрациям, получившим информацию о местных метеорологических параметрах для использования при оценке ослабления в газах, предлагается предоставить эти данные в МСЭ-R (особенно в 3-ю и 5-ю Исследовательские комиссии по радиосвязи).

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – Рекомендация МСЭ-R SF.765 была первоначально разработана для указания точных разносов вплоть до 2°. Следует отметить, что использованный в этой Рекомендации алгоритм действителен также при увеличении вплоть до 10° путем использования $B = 10^\circ$ в п. 1 Приложения 2 к Рекомендации МСЭ-R SF.765.

Приложение 1

Максимальная плотность э.и.и.м. передатчиков системы беспроводной фиксированной связи пункта с пунктом, работающих в полосе 25,25–27,5 ГГц, совместно используемой с межспутниковой службой

1 Введение

В данном Приложении приводится краткое описание результатов анализов, которые показывают, что критерии защиты, представленные в Рекомендации МСЭ-R SA.1155 для СРД, могут быть удовлетворены, за исключением случая связи главных лучей при излучениях станций беспроводной фиксированной связи пункта с пунктом.

2 Модели системы

2.1 Развертывание станций ФС для связи пункта с пунктом в полосе 25,25–27,5 ГГц

Следующие предположения, касающиеся технических и эксплуатационных характеристик станций ФС для связи пункта с пунктом, экстраполированы исходя из существующих систем диапазона 23 ГГц:

- Предполагается, что по всему миру в полосе 25,25–27,5 ГГц (диапазон 26 ГГц) работает 100 000 передатчиков.
- Ожидаемое распределение уровней плотности э.и.и.м. передатчиков:
 - предполагается, что более 70% всех линий ФС в полосе 25,25–27,5 ГГц будут работать на уровнях ниже +24 дБ(Вт/МГц);
 - предполагается, что менее 25% всех линий ФС будут работать в диапазоне от +24 дБ(Вт/МГц) до +33 дБ(Вт/МГц);
 - предполагается, что менее 5% всех линий ФС будут работать на уровнях выше +33 дБ(Вт/МГц).
- Одна частота на передатчик. Половина передатчиков работает в "прямых" каналах, а другая половина – в "обратных" каналах.

- Размещение частот радиостолов в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R F.748 (рекомендуемый диапазон значений ширины полосы канала от 112 МГц до 3,5 МГц и 2,5 МГц, а в будущем имеется возможность добавления полос шириной 1,75 МГц и 1,25 МГц).
- Рабочие каналы распределяются по полосе частот.
- Углы места обычно находятся в пределах 0° – 5° .
- Длина трассы обычно составляет 2–5 км.
- Для достижения готовности 99,999% в диапазоне 26 ГГц требуется наличие больших запасов на замирание в дожде.
- Крупные операторы систем ФС для связи пункта с пунктом все чаще применяют варианты наименьшей возможной мощности передатчиков, для того чтобы уменьшить расстояние повторного использования частот.
- В настоящее время имеется лишь незначительное количество видов оборудования, снабженных схемой автоматического регулирования мощности.

2.2 Развертывание СРД, использующих линии связи космос-космос межспутниковой службы

Ниже приводятся краткие сведения о технических и эксплуатационных характеристиках СРД, которые должны эксплуатировать агентство NASA в Соединенных Штатах Америки, Европейское космическое агентство (ЕКА), Российское космическое агентство и Национальное агентство космических разработок Японии (NASDA) и которые будут использовать линии связи космос-космос в диапазоне 26 ГГц:

- Местоположения на орбите указаны в Рекомендации МСЭ-R SA.1276.
- Типичные характеристики СРД:
 - имеются две антенные одностанционного доступа с большим коэффициентом усиления, пиковое значение усиления 58 дБи;
 - ширина луча приемной антенны по уровню 3 дБ составляет менее $0,2^{\circ}$;
 - приемная антенна может одновременно принимать один обратный сигнал в диапазоне 20/30 ГГц;
 - шумовая температура приемника СРД $T = 703$ К (плотность шума равна $-140,13$ дБ(Вт/МГц));
 - скорости передачи данных по обратному каналу: 1 кбит/с – 300 Мбит/с в полосе шириной 225 МГц;
 - скорости передачи данных по обратному каналу: 1 кбит/с – 800 Мбит/с в полосе шириной 650 МГц;
 - настраиваемая центральная частота приема с шагом 25 МГц (или менее).
- Центральные частоты СРД, выбираемые в соответствии с рекомендациями Группы по вопросам функциональной совместимости космических сетей (SNIP) для общих обратных каналов СРД, равны: 25,60 ГГц, 25,85 ГГц, 26,10 ГГц, 26,35 ГГц, 26,60 ГГц, 26,85 ГГц, 27,10 ГГц или 27,35 ГГц.

В СРД существующего поколения диапазона 26 ГГц методы уменьшения помех не изучались и не внедрялись.

3 Оценка помех

3.1 Критерии защиты СРД

В Рекомендации МСЭ-R SA.1155 "Критерии защиты, связанные с работой спутников ретрансляции данных" рекомендуется, чтобы максимальный уровень спектральной плотности мощности суммарных помех от всех источников, превышаемый в течение не более 0,1% времени, составлял -178 дБ(Вт/кГц)

в полосе 25,25–27,5 ГГц (это эквивалентно уровню –148 дБ(Вт/МГц)). Данный уровень основан на отношении $I/N = -10$ дБ и уменьшении запаса на линии на 0,4 дБ. Рекомендуемая максимальная ширина эталонной полосы составляет 1 кГц. Критерии защиты пересчитывают в максимальный уровень плотности э.и.и.м. помехи от ФС, равный 13,5 дБ(Вт/МГц), в направлении СРД, если имеет место связь через главный луч, как показано в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

**Максимальная плотность э.и.и.м. помехи от ФС
в направлении СРД при связи через главный луч**

Плотность э.и.и.м. ФС (дБ(Вт/МГц))	13,5
Потери в атмосфере (дБ)	3
Потери за счет поляризации (дБ)	3
Потери в свободном пространстве (дБ)	213,5
Пиковое усиление приемной антенны СРД (дБи)	58
Максимальная плотность помехи (дБ(Вт/МГц))	–148

3.2 Помехи при связи через главный луч

Критерии помех при связи через главный луч включают:

- допустимый предельный уровень плотности э.и.и.м. от ФС, который удовлетворяет критериям защиты СРД, приведенным в Рекомендации МСЭ-R SA.1155;
- вероятность появления помех в главном луче. Допустимый предельный уровень плотности э.и.и.м. от ФС рассчитывается исходя из предположения о наличии помех в совмещенном канале в направлении на орбиту СРД без наклона. Оценка вероятности появления помех в главном луче основана на условиях работы двух систем.

Случай излучения радиорелейной станции ФС в направлении на СРД и связи через главный луч антенны СРД с высоким коэффициентом усиления рассматривается для диапазона уровней плотности э.и.и.м. Результаты приведены в таблице 2, в которой показано, что спектральная плотность э.и.и.м. свыше 13,5 дБ(Вт/МГц) в предположении существования потерь 3 дБ вследствие поглощения в атмосфере и потерь 3 дБ на поляризацию приведет к более высокому уровню помех, по сравнению с уровнем, указанным в Рекомендации МСЭ-R SA.1155, если имеет место расположение по прямой линии.

ТАБЛИЦА 2

**Величина превышения критериев помех в зависимости от плотности э.и.и.м. ФС,
излучаемой в направлении СРД**

Плотность э.и.и.м. ФС (дБ(Вт/МГц))	13,5	24	33
Усиление антенны приемника космического аппарата СРД (дБи)	58	58	58
Потери в свободном пространстве (дБ)	213,5	213,5	213,5
Потери в атмосфере (дБ)	3	3	3
Потери на поляризацию (дБ)	3	3	3
Мощность помех, I (дБ(Вт/МГц))	–148	–137,5	–128,5
Критерии максимальных помех (дБ(Вт/МГц))	–148	–148	–148
<i>Критерии, превышаемые на (дБ)</i>	<i>0</i>	<i>10,5</i>	<i>19,5</i>

Следует отметить, что в некоторых климатических условиях при более высоких углах места потери в атмосфере могут быть ниже 3 дБ.

Моделирование проводилось для оценки помех в зависимости от процента времени, когда СРД следует по траектории спутника на низкой околоземной орбите (LEO). Для анализа помех в зависимости от процента времени необходимо смоделировать орбитальный полет спутника LEO. Использовался целый ряд углов наклона для спутников LEO. В каждом случае долгота наземной станции устанавливалась так, чтобы СРД находился в главном луче антенны наземной станции, направленным в горизонтальной плоскости.

Были осуществлены три различных вида моделирования. Продолжительность каждого вида моделирования составляла 100 дней с шагом по времени 0,1 мин., и для каждого шага рассчитывался уровень принимаемой помехи относительно уровня, принимаемого антенной приемника СРД при связи по основной оси. Моделирование осуществлялось для трех случаев; его результаты приведены на рис. 1. Эти случаи таковы:

- Случай 1:* высота орбиты низколетящего спутника пользователя 300 км, наклонение 85° и широта, на которой расположена станция ФС, 50° ;
- Случай 2:* высота орбиты низколетящего спутника пользователя 300 км, наклонение 65° и широта, на которой расположена станция ФС, 60° ;
- Случай 3:* высота орбиты низколетящего спутника пользователя 300 км, наклонение $28,5^\circ$ и широта, на которой расположена станция ФС, $28,5^\circ$.

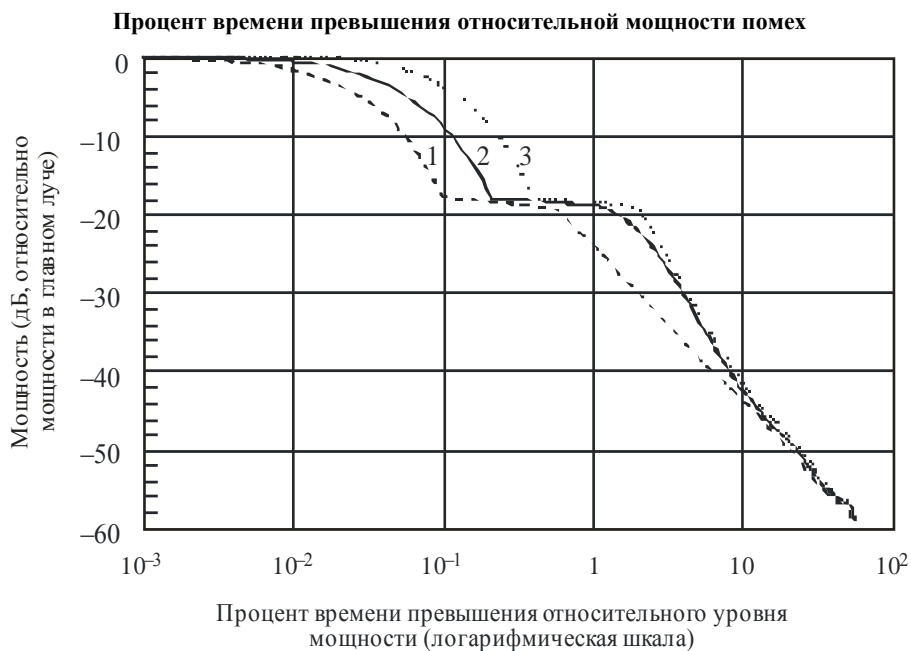
Приведенные на рис. 1 кривые могут использоваться для определения спектральной плотности э.и.и.м., полученной в условиях распространения радиоволн в свободном пространстве, которая обеспечит, чтобы мощность помех, принимаемых СРД, не превышала уровня -148 дБ(Вт/МГц) в течение более 0,1% времени. Расчеты сведены в таблице 3, из которой следует, что спектральная плотность э.и.и.м., требуемая для удовлетворения критериев защиты, является функцией параметров орбиты спутника LEO, по которой следует СРД, и местоположения передающей станции ФС. Приемлемый уровень спектральной плотности э.и.и.м. лежит в пределах от 31,5 дБ(Вт/МГц) для случая 1 до 17,5 дБ(Вт/МГц) для случая 3. Для целей данной Рекомендации приемлемо единое значение 24 дБ(Вт/МГц). Спектральная плотность э.и.и.м. получена в условиях распространения радиоволн в свободном пространстве.

Некоторые условия работы существенно снижают вероятность создания помех со стороны ФС спутнику СРД и их влияния, например:

- распределение уровней плотности э.и.и.м. ФС (см. п. 2.1), которое показывает, что менее 30% систем ФС, вероятно, работают с предельными уровнями выше $+24$ дБ(Вт/МГц);
- различный процент использования полосы частот в системах ФС и СРД (см. таблицу 5), который показывает, что только около 4% случаев появления связи через прямой луч, вероятно, приводит к помехам;
- ориентирование антенны передатчика ФС как по случайному углу азимута, который равномерно распределен в пределах от 0° до 360° , так и по равномерно распределенному случайному углу места в пределах между 0° и 5° (см. пп. 3.1 и 3.3 данного Приложения), что дополнительно снижает вероятность связи через прямой луч, по крайней мере, на три порядка величины.

Результирующая величина вероятности появления связи через прямой луч составляет менее 10^{-5} .

РИСУНОК 1



F.1249-01

ТАБЛИЦА 3

Результаты расчетов для определения допустимой спектральной плотности э.и.м. излучений станций ФС в направлении СРД

Случай	Мощность относительно мощности в главном луче на уровне 0,1 перцентиля (см. рис. 1) (дБ)	Плотность э.и.м. для $I = -148$ дБ(Вт/МГц)	Допустимая плотность э.и.м. (дБ(Вт/МГц))
1	-18	13,5	31,5
2	-9	13,5	22,5
3	-4	13,5	17,5

3.3 Суммарные помехи

Максимальная плотность э.и.м. была получена с учетом максимальных значений в каждом диапазоне распределения плотности мощности передатчика радиорелейной станции ФС, приведенного в п. 2.1 настоящего Приложения. Среднее взвешенное значение распределения для наихудшего случая обеспечивает уровень плотности э.и.м. 36,2 дБ(Вт/МГц), как показано в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

Предполагаемое распределение уровней плотности э.и.м. передачи ФС

50%	26 дБ(Вт/МГц)	398 Вт/МГц
40%	33 дБ(Вт/МГц)	1 995 Вт/МГц
10%	45 дБ(Вт/МГц)	31 623 Вт/МГц
Взвешенное среднее значение		36,19 дБ(Вт/МГц)

Число источников помех в совмещенном канале было получено на основе модели развертывания системы, описанной в п. 2.1 настоящего Приложения. По оценкам, в полосе 25,25–27,5 ГГц по всему миру может быть развернуто до 100 000 передатчиков ФС. На основе примера "Немецкого плана", приведенного в Рекомендации МСЭ-R F.748, можно предположить, что имеется:

- 50 000 передатчиков в нижней половине полосы (25,56–26,06 ГГц);
- 50 000 передатчиков в верхней половине полосы (26,68–27,18 ГГц).

Распределение каналов, используемое при моделировании по методу Монте-Карло, приведено в таблице 5 для одного сегмента полосы 500 МГц в плане типа "Немецкого плана". Из общего числа 100 000 передатчиков, развернутых по всему миру, в любой полосе шириной 1 МГц в общей сложности может быть 2001 излучатель в совмещенном канале.

ТАБЛИЦА 5

**Предполагаемое распределение ширины полосы канала,
используемой станциями связи пункта с пунктом**

Ширина полосы канала (МГц)	Предполагаемое использование (%)	Число станций на 50 000	Число излучателей в совмещенном канале
112	5	2 500	625
56	5	2 500	312
28	10	5 000	312
14	30	15 000	428
7	30	15 000	210
3,5	15	7 500	106
1,75	5	2 500	8
Всего			2 001

Пространственное распределение помех определяется на основе моделирования по методу Монте-Карло в предположении эквивалента 2000 передатчиков ФС, развернутых вокруг больших городов мира. Передатчики работали в совмещенном канале со средней плотностью э.и.и.м. 36 дБ(Вт/МГц), а антенны ФС были ориентированы по случайному углу азимута, равномерно распределенному в пределах между 0° и 360°. На рис. 2 и 3 представлены уровни плотности суммарных помех, принимаемых на СРД, расположенных в позициях на 41° з. д. и 174° з. д., соответственно, в зависимости от угла (крена и тангажа) наведения антенны космического аппарата.

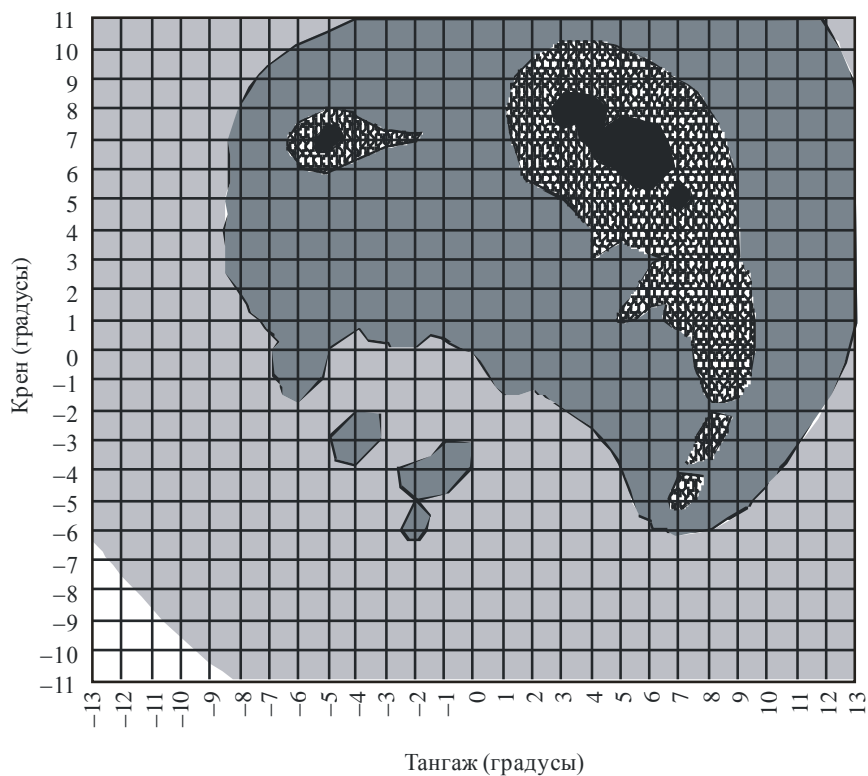
Для СРД, расположенного на 41° з. д. (рис. 2), максимальный уровень суммарной помехи составляет –148 дБ(Вт/МГц), и критерии защиты будут удовлетворяться, за исключением случая связи через главный луч, когда единичный передатчик ФС в совмещенном канале может создавать помехи, превышающие этот критерий.

На рис. 3 показано, что максимальный уровень суммарных помех в случае расположения СРД на 174° з. д. составляет –149,5 дБ(Вт/МГц), или на 1,5 дБ ниже критерия. И вновь критерий защиты СРД будет удовлетворяться, за исключением случаев связи через главный луч.

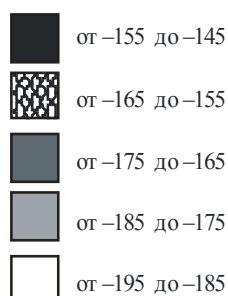
Как показано на рис. 2 и 3, суммарные помехи от развернутых случайным образом радиорелейных систем, как предполагается при моделировании по методу Монте-Карло, по-видимому, не создают помех, превышающих критерии, указанные в Рекомендации МСЭ-R SA.1155. На основании проведенного моделирования делается вывод, что суммарная помеха в направлении СРД, создаваемая излучениями развернутых случайным образом станций ФС для связи пункта с пунктом, не превысит –148 дБ(Вт/МГц) и что связь между главными лучами, как было рассмотрено в п. 3.2, приведет к помехам, превышающим критерии, указанные в Рекомендации МСЭ-R SA.1155.

РИСУНОК 2

Суммарные помехи (дБ(Вт/МГц)) в направлении СРД, расположенного в позиции 41° з. д., в зависимости от углов наведения антенны космического аппарата



Пиковый уровень суммарных помех = -148 дБ(Вт/МГц)
Критерии -148 дБ(Вт/МГц)



F.1249-02

4 Методы ослабления помех

4.1 Системы ФС

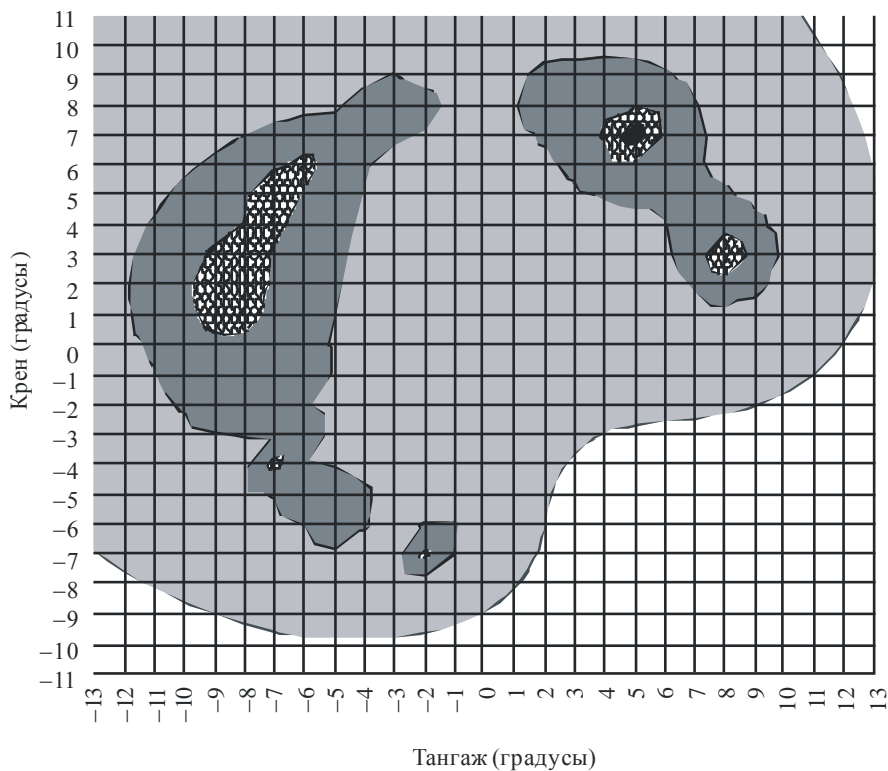
Проблема снижения помех охватывает практику правильного проектирования основной системы, а также использование методов, разработанных для конкретной цели уменьшения помех, которые включают:

- работу с минимально необходимой плотностью э.и.и.м., что практикуется по экономическим и эксплуатационным соображениям, таким как снижение затрат на оборудование и техническое обслуживание, уменьшение размеров и веса оборудования, снижение первичного энергопотребления и сокращение расстояний, соответствующих повторному использованию частоты;
- проектирование системы с учетом влияния ослабления сигналов в атмосфере;

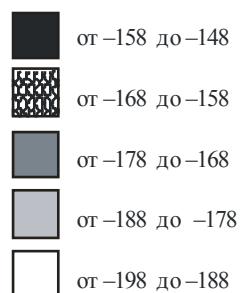
- выбор места расположения и рельефа местности, что существенно снижает излучение за пределами требуемой дальности действия станций ФС либо за счет затенения естественными и/или искусственными препятствиями, либо за счет частичного затенения зоны Френеля, которое приводит к ослаблению сигнала из-за дифракции (см. Приложение 3);
- применение автоматического регулирования мощности передатчика.

РИСУНОК 3

Суммарные помехи (дБ(Вт/МГц)) в направлении СРД, расположенного в позиции 174° з. д., в зависимости от углов наведения антенны космического аппарата



Пиковый уровень суммарной помехи — 149,5 дБ(Вт/МГц)
Критерии — 148 дБ(Вт/МГц)



F.1249-03

4.2 Системы СРД

Методы уменьшения помех, которые должны применяться в системах СРД, могут включать быструю смену частот и/или резервирование, преодоление случаев помех и адаптивное подавление помех. МСЭ-R приступил к изучению методов уменьшения помех.

4.3 Общая основа совместного использования частот

Планируемое сосуществование ФС и службы СРД создает новый ряд проблем совместного использования частот, которые требуют нестандартного подхода. Наиболее многообещающим подходом является установление на рабочем уровне общей основы, которая:

- облегчает взаимопонимание в отношении требований служб и условий эксплуатации;
- обеспечивает разработку соответствующих практических мер по совместному использованию частот;
- способствует введению в обеих службах мер противодействия помехам.

5 Выводы

Если предположить, что средняя плотность э.и.и.м. ФС при излучении с малыми углами места и случайными углами азимута составляет 36 дБ(Вт/МГц), что на станциях ФС и СРД используются антенны с узкими диаграммами направленности и с большим коэффициентом усиления и что используются планы организации радиостолов в ФС, то оказывается, что критерии защиты СРД, приведенные в Рекомендации МСЭ-R SA.1155, могут быть удовлетворены, за исключением случаев связи через главный луч или вблизи него. Для удовлетворения критериев защиты согласно Рекомендации МСЭ-R SA.1155 требуется, чтобы предельный уровень излучений станций ФС в направлении местоположений СРД на орбите составлял 24 дБ(Вт/МГц). Этот уровень относится к условиям распространения радиоволн в свободном пространстве.

Установление общей основы совместного использования частот будет способствовать практическому внедрению данной Рекомендации.

Приложение 2

Метод расчета углов разноса между лучами передающих антенн станций ФС для связи пункта с пунктом и направлениями на геостационарные спутники ретрансляции данных

1 Введение

В данном Приложении изложен метод расчета углов разноса между лучами передающих антенн ФС и направлениями на геостационарные спутники ретрансляции данных, расположенные на позициях, указанных в п. 2 раздела *рекомендует* основного текста настоящей Рекомендации, с учетом явлений рефракции в атмосфере и местного горизонта.

2 Параметры станций ФС

Определяются следующие параметры станций ФС:

ζ : широта местоположения станции (абсолютное значение);

α_r : азимут луча антенны, измеренный по часовой стрелке от севера;

ε_r : угол места луча антенны;

h : высота антенны над уровнем моря (км);

δ : разность по долготе (абсолютное значение) между станцией и одним из спутников, указанных в п. 2 раздела *рекомендует*.

Если δ превышает 90° (точнее, если $\cos \delta < 0$), то спутник не виден со стороны станции ФС и, следовательно, нет необходимости проводить дальнейшие вычисления. (Даже если δ немного меньше 90° , спутник может быть не виден, но это будет определено позднее.)

3 Определение азимута спутника

При использовании эллипсоидальной модели форма Земли характеризуется параметрами $R = 6378,14$ км (экваториальный радиус Земли) и $f = 1/298,25$ (коэффициент неровности Земли). Следовательно, полярный радиус Земли определяется как $(1 - f)R$.

В этом случае геоцентрическая широта ζ_1 и эффективный радиус Земли R_1 на географической широте ζ и высоте антенны h определяются как:

$$\zeta_1 = \arctan [(1 - f)^2 \tan \zeta], \quad (1)$$

$$R_1 = R(1 - f \sin^2 \zeta_1) + h. \quad (2)$$

Далее рассчитывается величина Ψ (дуга большого круга между станцией ФС и подспутниковой точкой) как:

$$\Psi = \arccos (\cos \zeta_1 \cos \delta). \quad (3)$$

После этого азимут (α_s) спутника, видимый со станции ФС, определяется следующим образом:

$$\alpha'_s = \arccos (\tan \zeta_1 \cot \Psi). \quad (4)$$

$$\alpha_s = \alpha'_s = 180^\circ \quad \text{для станции ФС, расположенной в северном полушарии, и спутников, находящихся к западу от станции ФС} \quad (5a)$$

$$\alpha_s = 180^\circ - \alpha'_s \quad \text{для станции ФС, расположенной в северном полушарии, и спутников, находящихся к востоку от станции ФС} \quad (5b)$$

$$\alpha_s = 360^\circ - \alpha'_s \quad \text{для станции ФС, расположенной в южном полушарии, и спутников, находящихся к западу от станции ФС} \quad (5c)$$

$$\alpha_s = \alpha'_s \quad \text{для станции ФС, расположенной в южном полушарии, и спутников, находящихся к востоку от станции ФС} \quad (5d)$$

4 Определение угла места спутника

Сначала вычисляется угол места (ε'_s) спутника, под которым он виден со станции ФС, в предположении отсутствия влияния рефракции в атмосфере:

$$\varepsilon'_s = \arctan \left(\frac{K \cos \Psi - 1}{K \sin \Psi} \right), \quad (6)$$

где:

$$K = R_S R_1;$$

$$R_S = 42\,164 \text{ км (радиус орбиты).}$$

Для учета влияния рефракции в атмосфере и местного горизонта определяются следующие углы места:

ε_{m1} : угол места в направлении на местный горизонт при максимальном искривлении траектории в атмосфере, видимый с высоты антенны ФС в азимуте (α_s) спутника (см. Примечание 1);

ε_{m2} : угол места в направлении на местный горизонт при минимальном искривлении траектории в атмосфере, видимый с высоты антенны ФС в азимуте (α_s) спутника (см. Примечание 1).

Затем определяется видимость спутника следующим образом:

- вычисляется $\varepsilon_1 = \varepsilon_{m1} - \tau_{\max.}(\varepsilon_{m1}, h)$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_{m2} - \tau_{\min.}(\varepsilon_{m2}, h)$, где $\tau_{\max.}(\varepsilon, h)$ и $\tau_{\min.}(\varepsilon, h)$ представляют собой, соответственно, максимальные и минимальные искривления траектории в атмосфере, соответствующие углу места ε , численные формулы которых приведены в Примечании 2;
- если $\varepsilon_2 \leq \varepsilon'_s$, то спутник виден всегда;
- если $\varepsilon_1 \leq \varepsilon'_s < \varepsilon_2$, то спутник виден в течение определенного процента времени;
- если $\varepsilon'_s < \varepsilon_1$, то спутник не виден при любых условиях рефракции в атмосфере, и поэтому нет необходимости в дальнейших вычислениях.

Когда $\varepsilon_2 \leq \varepsilon'_s$, углы места $\varepsilon_{s \max.}$ и $\varepsilon_{s \min.}$ спутника, соответствующие максимальному и минимальному искривлению траектории в атмосфере, могут быть рассчитаны путем решения следующих уравнений (см. Примечание 3):

$$\varepsilon_{s \max.} - \tau_{\min.}(\varepsilon_{s \max.}, h) = \varepsilon'_s, \quad (7a)$$

$$\varepsilon_{s \min.} - \tau_{\min.}(\varepsilon_{s \min.}, h) = \varepsilon'_s. \quad (7b)$$

Когда $\varepsilon_1 \leq \varepsilon'_s < \varepsilon_2$, нет необходимости решать уравнение (7b), а только требуется решить уравнение (7a). В этом случае следует использовать $\varepsilon_{s \min.} = \varepsilon_{m2}$.

Угол места ε_s , который обеспечивает минимальный угол разноса с достаточной точностью, определяется следующим образом:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s \max.} \quad \text{ДЛЯ} \quad \varepsilon_{s \max.} \leq \varepsilon_r, \quad (8a)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_r \quad \text{ДЛЯ} \quad \varepsilon_{s \min.} \leq \varepsilon_r < \varepsilon_{s \max.}, \quad (8b)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s \min.} \quad \text{ДЛЯ} \quad \varepsilon_r < \varepsilon_{s \min.} \quad (8c)$$

5 Определение угла разноса

Минимальный угол разноса, SA, между лучом антенны ФС и направлением на геостационарный СРД, под которым он виден от станции ФС, можно рассчитать как:

$$SA = \arccos [\cos \varepsilon_r \cos \varepsilon_s \cos(\alpha_r - \alpha_s) + \sin \varepsilon_r \sin \varepsilon_s]. \quad (9)$$

Угол разноса должен рассчитываться для каждого из геостационарных спутников передачи данных, как указано в п. 2 раздела *рекомендует*.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Если местный горизонт образуется за счет ровного рельефа местности или моря, то ε_m определяется как:

$$\varepsilon_m = -\arccos \left[\frac{R + h_1}{R + h} \times \frac{1 + N_0 \times 10^{-6}(1 + \Delta N/N_0)^{h_1}}{1 + N_0 \times 10^{-6}(1 + \Delta N/N_0)^h} \right], \quad (10)$$

где:

h : высота (км) антенны станции над уровнем моря;

h_1 : высота (км) местного горизонта ($h \geq h_1$);

R : радиус Земли предполагается равным 6370 км.

Согласно Рекомендации МСЭ-R SF.765, ε_{m1} – это угол места, соответствующий максимальному искривлению траектории в атмосфере ($N_0 = 400$ и $\Delta N = -68$), а ε_{m2} – это угол места, соответствующий минимальному искривлению траектории в атмосфере ($N_0 = 250$ и $\Delta N = -30$). Следует отметить, что $\varepsilon_{m1} \geq \varepsilon_{m2}$.

На практике может оказаться затруднительным определить точные значения ε_{m1} и ε_{m2} с учетом сложной линии местного горизонта. В таком случае может быть проще определить значения ε_{m1} и ε_{m2} с использованием формулы (10), полагая $h_1 = 0$. Это обычно дает точное значение угла разноса. Однако если $\varepsilon_{s, макс.}$ больше чем ε_{m1} , но очень близко к ε_{m1} , то есть вероятность, что спутник может быть не виден из-за влияния местного горизонта. В этом случае расчеты следует повторить, используя фактические значения ε_{m1} и ε_{m2} .

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Искривление траектории в атмосфере (градусы) можно вычислить, применяя следующие формулы, основанные на Приложении 2 к Рекомендации МСЭ-R SF.765:

$$\tau_{макс.}(\varepsilon, h) = 1 / [0,7885809 + 0,175963 h + 0,0251620 h^2 + \varepsilon (0,549056 + 0,0744484 h + 0,0101650 h^2) + \varepsilon^2 (0,0187029 + 0,0143814 h)] \quad (11a)$$

$$\tau_{мин.}(\varepsilon, h) = 1 / [1,755698 + 0,313461 h + \varepsilon (0,815022 + 0,109154 h) + \varepsilon^2 (0,0295668 + 0,0185682 h)], \quad (11b)$$

где:

ε : угол места (градусы);

h : высота (км) антенны над уровнем моря.

Приведенные выше формулы действительны для области, где $\varepsilon \geq \varepsilon_{m1}$ или $\varepsilon \geq \varepsilon_{m2}$. Алгоритм в данном Приложении гарантирует, что указанные формулы применяются только в тех случаях, когда они действительны.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Необходима некоторая осторожность в отношении обеспечения сходимости при решении уравнения (7а), особенно когда высота h велика, а значение ε'_s отрицательно. Поэтому одним из подходов к решению уравнения (7а) является применение метода Ньютона-Рэфсона с $\varepsilon_{s, макс.} = \max(\varepsilon'_s, \varepsilon_{m1})$ в качестве исходной величины. После нескольких итераций сходимость уравнения будет обеспечена.

Аналогичный подход можно применить к решению уравнения (7б). В этом случае исходной величиной должно быть $\varepsilon_{s, мин.} = \max(\varepsilon'_s, \varepsilon_{m2})$.

ПРИМЕЧАНИЕ 4. – В Дополнении 1 приведена компьютерная программа для вычисления углов разноса на основе данного Приложения.

Дополнение 1 к Приложению 2

```

/*****
/* название файла : drsang_b.c
/* язык : C
/* функция : Вычислить углы разноса между станциями фиксированной службы
/* лучи и направления передающих антенн
/* в направлении геостационарных спутников ретрансляции данных
/*****

/*---- include files -----*/
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <errno.h>

static double pi,rd,dr,em1,em2,a[3],b[3];

/*-----*/
/* модуль : искривление
/* функция : установление характеристик искривления в атмосфере
/* в h0 : высота антенны станции над уровнем моря (км)
/* h1 : высота местного горизонта (h0>=h1) (км)

```



```

/* из em1,2 : углы места в направлении местного горизонта при максимальном */
/* и минимальном искривлении в атмосфере (см. уравнение (8)) */
/* a,b : коэффициенты искривления в атмосфере */
/* при максимальном и минимальном искривлении в атмосфере */
/*-----*/
void bending(h0,h1)
    double h0,h1;
{
    double r=6378.0; /* earth radius (km) */
    em1=-acos((r+h1)/(r+h0)*
        (1+0.00040*pow(0.83,h1))/(1+0.00040*pow(0.83,h0)));
    em2=-acos((r+h1)/(r+h0)*
        (1+0.00025*pow(0.88,h1))/(1+0.00025*pow(0.88,h0)));
    a[0]=(0.7885809+0.1759630*h0+0.0251620*h0*h0)*rd;
    a[1]=(0.5490560+0.0744484*h0+0.0101650*h0*h0)*rd*rd;
    a[2]=(0.0187029+0.0143814*h0)*rd*rd*rd;
    b[0]=(1.7556980+0.3134610*h0)*rd;
    b[1]=(0.8150220+0.1091540*h0)*rd*rd;
    b[2]=(0.0295668+0.0185682*h0)*rd*rd*rd;
}
/*-----*/
/* модуль : tmax,tmin,dtmax,dtmin */
/* функция : вычисление искривления в атмосфере в градусах */
/* в e : угол места (градусы) */
/* из tmax : искривление в атмосфере (см. уравнение (11a)) */
/* dtmax : производная от tmax */
/* tmin : искривление в атмосфере (см. уравнение (11b)) */
/* dtmin : производная от tmin */
/*-----*/
double tmax(e)
    double e;
    {return (1.0/(a[0]+e*(a[1]+a[2]*e)));}

double dtmax(e)
    double e;
    {return (-(a[1]+2.0*a[2]*e)*pow(tmax(e),2.0));}

double tmin(e)
    double e;
    {return (1.0/(b[0]+e*(b[1]+b[2]*e)));}

double dtmin(e)
    double e;
    {return (-(b[1]+2.0*b[2]*e)*pow(tmin(e),2.0));}
/*-----*/
/* модуль : sangle */
/* функция : вычисление угла разноса в градусах */
/* в slon : долгота спутника ретрансляции данных (радианы) */
/* ilat : северное или южное полушарие */
/* rlat : широта радиорелейной станции (радианы) */
/* rlon : долгота радиорелейной станции (радианы) */
/* az0 : азимут луча антенны (радианы) */
/* e0 : угол места луча антенны (радианы) */

```

```

/* h0 : высота антенны станции над уровнем моря (км) */
/* из sa : угол разноса */
/*-----*/
double  sangle(slon,ilat,rlat,rlon,az0,e0,h0)
        double  slon,ilat,rlat,rlon,az0,e0,h0;

{
double delta,zeta,r1,arc,tanarc;
double azss,azs,ees,e1,e2,es1,esmax,es2,esmin,es,sa;
double r=6378.14; /* earth's equatorial radius */
double f=1/298.25; /* earth's flatness factor */
double rs=42164; /* orbit radius */

delta=rlon-slon;
if(cos(delta)<=0) {sa=500.0;goto end_sa;}
/* ----- Determination of the satellite azimuth -----*/
zeta=atan(pow(1-f,2.0)*tan(rlat)); /* eq.(1) */
r1=r*(1-f*pow(sin(zeta),2.0))+h0; /* eq.(2) */
arc=acos(cos(zeta)*cos(delta)); /* eq.(3) */
tanarc=tan(arc); if(tanarc<tan(zeta)) tanarc=tan(zeta);
if(tanarc==0.0) azss=0.0;
else azss=acos(tan(zeta)/tanarc); /* eq.(4) */
if((ilat>0)&&(sin(delta)>=0)) azs=azss+pi; /* eq.(5a) */
else if((ilat>0)&&(sin(delta)<0)) azs=pi-azss; /* eq.(5b) */
else if(sin(delta)>=0) azs=2*pi-azss; /* eq.(5c) */
else azs=azss; /* eq.(5d) */
/* ----- Determination of the satellite elevation -----*/
if(arc==0.0) ees=pi/2.0;
else ees=atan((cos(arc)-r1/rs)/sin(arc)); /* eq.(6) */
e1=em1-tmax(em1);
e2=em2-tmin(em2);
if(ees<e1) {sa=500.0; goto end_sa;}
else{
/* ----- solve eq.(7a), (see Note 3) ----- */
es1=10.0;if(ees<em1) esmax=em1; else esmax=ees;
while(fabs(esmax-es1)>1.0e-5){
es1=esmax;
esmax=es1-(es1-tmax(es1)-ees)/(1.0-dtmax(es1));
}
if(ees<e2) esmin=em2;
else{
/* ----- solve eq.(7b), (see Note 3) ----- */
es2=10.0;if(ees<em2) esmin=em2; else esmin=ees;
while(fabs(esmin-es2)>1.0e-5){
es2=esmin;
esmin=es2-(es2-tmin(es2)-ees)/(1.0-dtmin(es2));
}
}
}
if(esmax<=e0) es=esmax; /* eq.(8a) */
else if(esmin<=e0) es=e0; /* eq.(8b) */
else es=esmin; /* eq.(8c) */
/* ----- Determination of the separation angle ----- eq.(9) */
sa=rd*acos(cos(e0)*cos(es)*cos(az0-azs)+sin(e0)*sin(es));
end_sa:
return sa;
}
}

```

```

/*-----*/
/* основная программа */
/*-----*/
void main()
{
    double lonsat[]={-174,-171,-170,-167.5,-164.2,-160,-139,-62,-49,
-46,-44,-41,-32,-16,-
12,10.6,16.4,16.8,21.5,47,59,77,80,85,89,90.75,95,113,121,133,160,167,171,176.8,177.5};
    const int nsat=sizeof lonsat / sizeof lonsat[0];
    double sa[sizeof lonsat / sizeof lonsat[0]];
    charstr[1];
    double ilat,latd,latm,lats,rlat;
    double ilon,lond,lonm,lons,rlon;
    double az0d,az0,e0d,e0,h0m,h0,h1m,h1;
    double slon,samin;
    int isat;

    pi=4.0*atan(1.0); /* circular constant */
    rd=180.0/pi; /* radian to degree */
    dr=pi/180.0; /* degree to radian */
    /* ----- Parameter input ----- */
    printf("Parameters of the fixed service station \n");
    input_NS:
    printf("Hemisphere of the station : northern or southern (N/S) ? \n");
    scanf("%s",&str);
    if(*str=='N' || *str=='n') ilat=1;
    else if(*str=='S' || *str=='s') ilat=-1;
    else goto input_NS;
    input_LAT:
    printf("LAT : latitude (degree,minute,second) ? \n");
    scanf("%le,% le,% le",&latd,&latm,&lats);
    latd=ilat*(latd+latm/60.0+lats/3600.0); rlat=fabs(latd*dr);
    input_EW:
    printf("Longitude : east or west (E/W) ? \n");
    scanf("%s",&str);
    if(*str=='E' || *str=='e') ilon=1.0;
    else if(*str=='W' || *str=='w') ilon=-1.0;
    else goto input_EW;
    input_LON:
    printf("LON : longitude (degree,minute,second) ? \n");
    scanf("%le,% le,% le",&lond,&lonm,&lons);
    lond=ilon*(lond+lonm/60.0+lons/3600.0);rlon=lond*dr;
    input_AZ:
    printf("AZ0 : antenna azimuth, clockwise from the North (degree) ?\n");
    scanf("%le",&az0d); az0=az0d*dr;
    input_E0:
    printf("E0 : antenna elevation (degree) ? \n");
    scanf("%le",&e0d); e0=e0d*dr;
    input_ALT:
    printf("H0 : antenna altitude (m) ? \n");
    scanf("%le",&h0m); h0=h0m/1000.0;
    printf("H1 : horizon altitude (m) ? \n");
    scanf("%le",&h1m); h1=h1m/1000.0;
    if(h1>h0) {printf("h1<=h0"); goto input_ALT;}

    /* ----- Расчеты ----- */
}

```

```

bending(h0,h1);
samin=1000.0;
for(isat=0;isat<nsat;isat++){
    slon=dr*lonsat[isat];
    sa[isat]=sangle(slon,ilat,rlat,rлон,az0,e0,h0);
    if(sa[isat]<samin) samin=sa[isat];
}
/* ----- Print separation angle ----- */
printf("\nParameters of the fixed service station \n");
printf(" latitude   : %7.2f (degree) \n",latd);
printf(" longitude   : %7.2f (degree) \n",lond);
printf(" antenna azimuth : %7.2f (degree) \n",az0d);
printf(" antenna elevation : %7.2f (degree) \n",e0d);
printf(" antenna altitude : %7.0f (m) \n",h0m);
printf(" horizon altitude : %7.0f (m) \n",h1m);
printf("\nGeostationary data relay satellites \n");
printf(" No. Longitude Separation angle \n");
for(isat=0;isat<nsat;isat++){
    printf("%5d %7.2f %7.2f \n",
        isat+1,lonsat[isat],sa[isat]);
}
printf("Minimum separation angle = %7.2f (degree) \n",samin);
}

```

Приложение 3

Ослабление помех за счет ослабления сигналов из-за дифракции

1 Введение

В определенных обстоятельствах затенение зоны Френеля снизит спектральную плотность э.и.и.м. излучений станции ФС в направлении местоположений СРД на орбите. Подавляющее большинство систем беспроводной фиксированной связи пункта с пунктом, развернутых в диапазоне 26 ГГц, расположено в городских зонах, где то или иное здание может заслонять трассу передачи между передающей станцией ФС и местоположением СРД на орбите. Следует отметить, что это препятствие не обязательно является тем зданием, на котором установлена приемная антенна ФС.

Можно показать, что такое затенение чувствительно к небольшим изменениям в местоположении передающей станции ФС, которые могут существенно снизить возможные помехи. Кроме того, можно показать, что такое затенение чувствительно к небольшим изменениям в местоположении СРД, вызванным обычными возмущениями орбиты, так что помехи, создаваемые последовательно возникающими случаями потенциально неблагоприятного геометрического расположения низколетящих спутников, передатчика ФС и СРД, будут существенно меняться, при этом после появления значительных помех могут появляться приемлемые помехи.

В данном Приложении на упрощенном примере показан диапазон потерь из-за дифракции, которые могут быть реализованы за счет затенения зоны Френеля.

2 Основные расчеты ослабления сигналов за счет дифракции

В Рекомендации МСЭ-R P.526 приведены основные методы и формулы для расчетов ослабления за счет дифракции. В разделе 4 данной Рекомендации ослабление за счет дифракции рассматривается в зависимости от степени затенения зоны Френеля и от особенностей затеняющего препятствия. Результирующие уровни ослабления являются суммой двух следующих вкладов:

- a) ослабление за счет дифракции, полученное при использовании модели остrokонечного препятствия;
- b) дополнительный вклад, обусловленный физическими особенностями реального препятствия, отличающимися от особенностей модели остrokонечного препятствия.

Совместный результирующий эффект может существенно превышать вклад от ослабления, получаемый при использовании модели одного остrokонечного препятствия.

Вклад a) (базовая модель одного остrokонечного препятствия) рассматривается в п. 4.1 Рекомендации МСЭ-R P.526. В ней даны формулы для расчетов ослабления за счет дифракции с использованием безразмерного параметра, показывающего степень затенения первой зоны Френеля; на рис. 4 (таком же, как рис. 4 в Рекомендации МСЭ-R P.526) приведен график результирующего ослабления за счет дифракции в зависимости от этого безразмерного параметра. Например, при затенении половины первой зоны Френеля происходит ослабление сигнала за счет дифракции на 6 дБ; соответствующие уровни ослабления при затенении 1/4, 3/4 этой зоны и при полном ее затенении составляют, соответственно, 2, 10 и 14 дБ. Распространение степени затенения на всю вторую зону Френеля увеличит ослабление за счет дифракции до 22 дБ.

Вклад b) (дополнительный вклад в величину ослабления за счет дифракции, обусловленный особенностями препятствия, отличающегося от модели одного остrokонечного препятствия) рассматривается в пп. 4.2–4.5 Рекомендации МСЭ-R P.526.

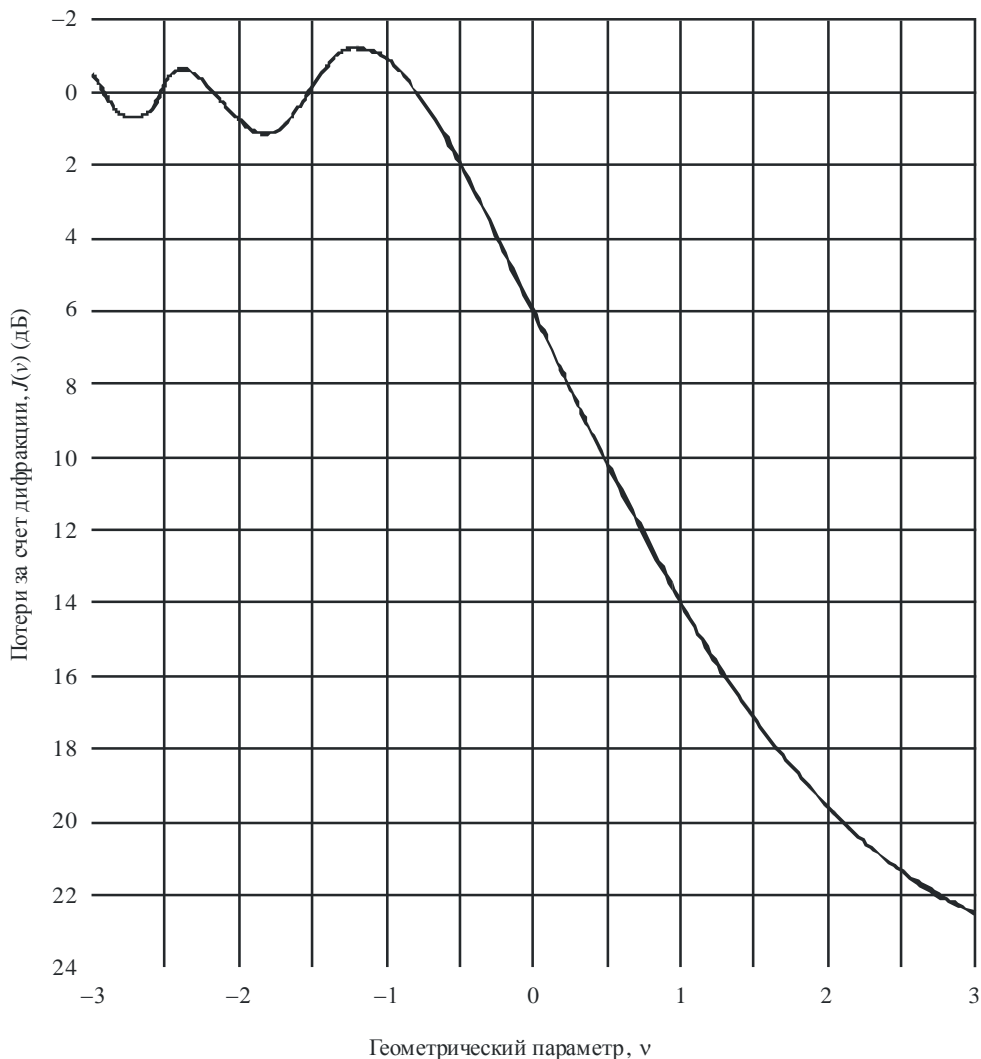
В разделе 4.3 Рекомендации МСЭ-R P.526 рассматривается случай одного округлого препятствия. Этот вариант применим, когда форма верхней части здания, преграждающей путь сигнала в направлении орбитальной станции СРД, может быть смоделирована таким образом. Представленный метод может использоваться для расчета величины дополнительного ослабления сигнала, обусловленного формой и высотой препятствия.

3 Примеры ослабления сигнала за счет дифракции

Анализ первого порядка с использованием методов расчета из Рекомендации МСЭ-R P.526 предназначен для обеспечения глубокого понимания значимости меняющего ослабления за счет дифракции как фактора, способствующего снижению предельных уровней спектральной плотности э.и.и.м. излучений станций ФС в направлении местоположений СРД на орбите.

РИСУНОК 4

Потери за счет дифракции на остроконечном препятствии
(см. Рекомендацию МСЭ-R P.526)



F.1249-04

Предполагается, что станция ФС находится на горизонте, видимом с СРД, и направлена на СРД. Излучения станции ФС в направлении СРД частично затеняются препятствием на приемной антенне ФС или вблизи нее. Это препятствие моделируется в виде одного остроконечного препятствия, как показано на рис. 5. Передающая станция размещена в пункте P_1 , а принимающий СРД – в пункте P_2 . Расстояние от передающей станции до препятствия, вызывающего дифракцию, равно d_1 . Расстояние до СРД так велико, что его не включают в виде множителя в расчеты потерь из-за дифракции. Высота препятствия над прямой трассой обозначается как h . Угол дифракции, обозначаемый как θ , имеет тот же знак, что и h . (Предполагается, что угол θ меньше 0,2 рад., или 12° .)

Вводится безразмерный параметр v , позволяющий рассчитать результирующее поле по данным рис. 4 на основе перечисленных выше геометрических факторов и длины волны λ рабочей частоты. Этот параметр получен из уравнения (14) Рекомендации МСЭ-R P.526.

$$v = \theta \sqrt{\frac{2d_1}{\lambda}} . \quad (12)$$

Пример устанавливает определенные границы величины ослабления сигнала при излучении, которые можно ожидать при работе станций, если применяется затенение зоны Френеля.

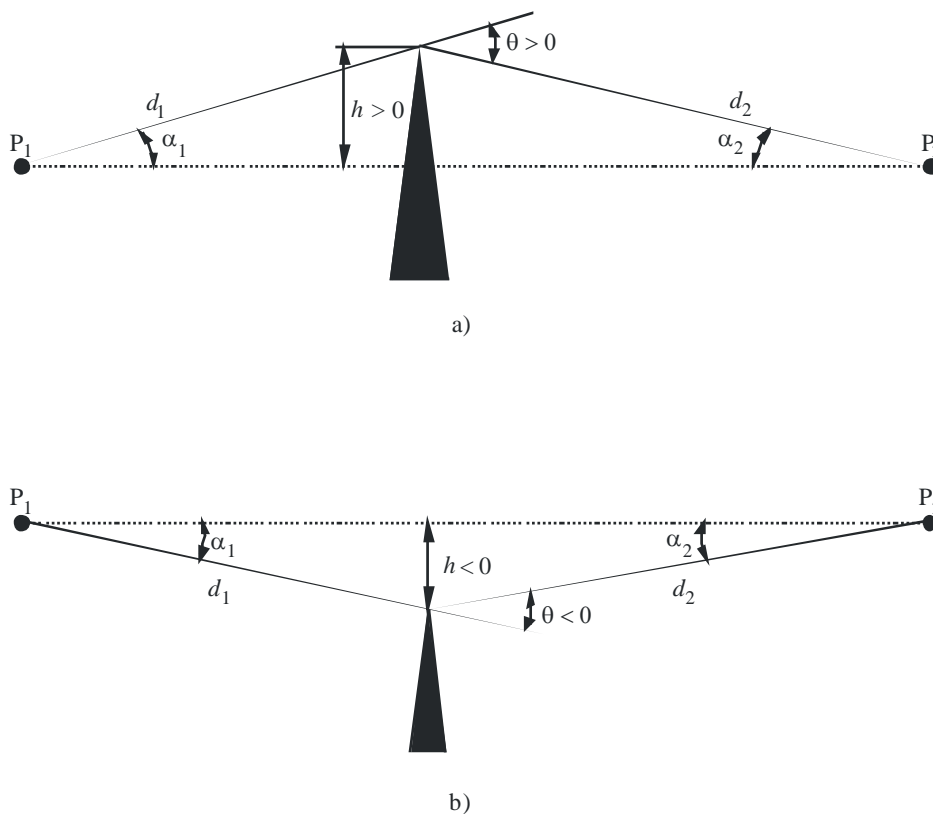
Предположим, что препятствием служит здание, находящееся на расстоянии 4 км от передающей антенны. Верхняя часть здания приблизительно соответствует одиночному остроконечному препятствию. Передающая антенна имеет коэффициент усиления 40 дБ, ширину диаграммы направленности $1,64^\circ$ по уровню 3 дБ и не закрытую препятствиями трассу до приемной антенны. Далее предполагается, что луч передающей антенны проходит на одинаковом расстоянии выше и ниже верхней части здания. Для рабочей частоты 26 ГГц уравнение (15) приводится к виду:

$$v = 833 \theta. \quad (13)$$

При $\theta = 0$ параметр v равен 0 для внеосевого угла 0° . Как видно из рис. 4, это приводит к потерям из-за дифракции в 6 дБ для приемной антенны СРД, расположенной за препятствием на прямой линии, соединяющей три точки: передающую антенну, вершину препятствия и приемную антенну СРД.

РИСУНОК 5

Геометрические элементы
(Рекомендация МСЭ-R P.526)



α_1 и α_2 – угол между вершиной препятствия и одним пунктом, видимым из другого пункта

F.1249-05

Однако если вершина препятствия находится на $0,0017$ рад. или на $0,1^\circ$ выше линии, соединяющей передающую антенну ФС со станцией СРД, что соответствует либо увеличению высоты препятствия на 7 м, либо установке передающей антенны ФС на 7 м ниже, то $v = 1,45$ и потери за счет дифракции возрастут до 16,5 дБ.

С другой стороны, если вершина препятствия на 7 м ниже трассы распространения помех, $v = -1,45$ и дифракционные потери для модели одиночного остроконечного препятствия вызовут увеличение сигнала примерно на 1 дБ.

4 Изменчивость уровня ослабления за счет дифракции при воздействиях помех на СРД

В этом примере изменение уровня помех, создаваемых СРД на орбите, наклоненной на $0,1^\circ$, оценивалось для станции ФС, расположенной на 45° с. ш. Предполагалось, что СРД находится на прямой линии, соединяющей передающую станцию ФС, вершину остроконечного препятствия и СРД. Спутник СРД находился в своем номинальном местоположении на орбите, т. е. располагался в экваториальной плоскости. Таким образом, номинальный уровень помех составлял -6 дБ относительно уровня в свободном пространстве, рассматривавшегося выше.

При определенном, но небольшом угле наклона орбиты широта и долгота подспутниковой точки СРД за 24 часа определяются как:

$$\varphi_s = i \sin(\omega_e t), \quad (14a)$$

$$\Delta\lambda_s = \frac{i^2}{4} \sin(2\omega_e t), \quad (14b)$$

где:

φ_s : широта подспутниковой точки спутника СРД;

$\Delta\lambda_s$: шаг изменения долготы подспутниковой точки СРД;

i : угол наклона орбитальной плоскости СРД;

ω_e : скорость вращения Земли;

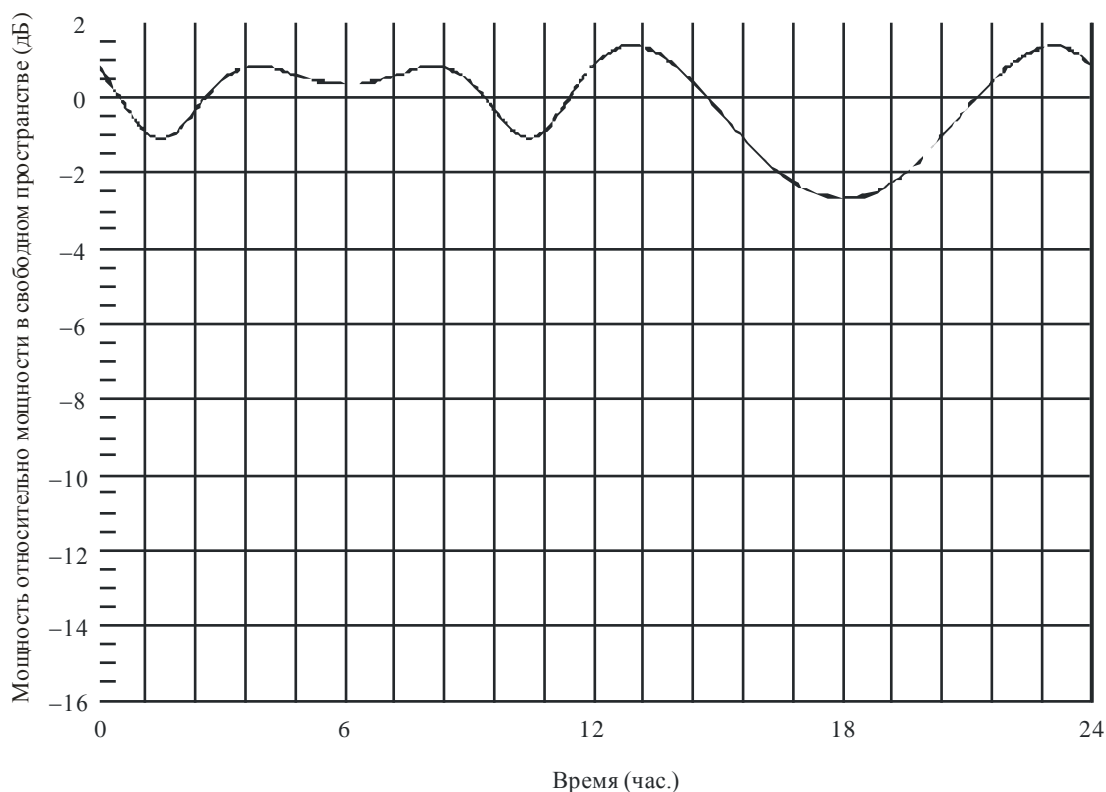
t : время работы.

Суточное изменение мощности помех, принимаемых СРД, можно оценить, используя уравнение (13) для изменений угла места. Предполагается, что вершина препятствия параллельна местной горизонтальной плоскости.

Для определения влияния смещения номинальной позиции СРД было проанализировано два случая. Предполагалось, что в первом случае номинальная позиция СРД составляет $0,1^\circ$ выше линии, соединяющей передающую антенну ФС и край затеняющего здания, а во втором – $0,1^\circ$ ниже линии, соединяющей передающую антенну ФС и край затеняющего здания. Эти отклонения вполне укладываются в пределы одной половины ширины луча диаграммы направленности $1,64^\circ$ по уровню 3 дБ. Кроме того, предполагалось, что станция ФС расположена на 45° с. ш. и что орбитальная плоскость СРД наклонена на $0,1^\circ$ относительно экваториальной плоскости. Суточные изменения мощности помех, принимаемых СРД, относительно уровня мощности в свободном пространстве показаны для этих двух случаев на рис. 6 и 7. На рис. 6 показаны относительно небольшие суточные изменения мощности помех, а на рис. 7 показано, что суточные изменения лежат в пределах от $-9,5$ до -21 дБ.

РИСУНОК 6

Суточные изменения мощности помех, принимаемых СРД на наклонной орбите $0,1^\circ$:
сдвиг местоположения СРД на орбите на $0,1^\circ$ в плоскости угла места; станция ФС находится на 45° с. ш.



F.1249-06

5 Проектирование линий связи ФС и практические меры, повышающие эффективность действий по уменьшению помех за счет ослабления сигналов из-за дифракции

Как следует из п. 2.4 раздела *рекомендует* данной Рекомендации, задача состоит в том, чтобы содействовать, при необходимости, проектированию линий связи ФС и осуществлению практических мер, обеспечивающих наибольшее возможное затенение потенциальных трасс воздействия помех на СРД, с тем чтобы уровни мешающих передач ФС эффективно снижались за счет ослабления сигналов из-за дифракции.

Эта задача совместного использования частот службами ФС и СРД согласуется с задачей контроля помех в рамках службы ФС для уменьшения расстояний повторного использования частот при крупномасштабном развертывании систем ФС в городских и пригородных зонах, при котором учитывается подавляющее большинство существующих и будущих применений ФС в диапазоне 26 ГГц. С этой целью антенны станции ФС предпочтительно устанавливать на торцах зданий, а не на их крышах; если же эти антенны необходимо установить на крышах зданий, то их предпочтительно размещать как можно ниже.

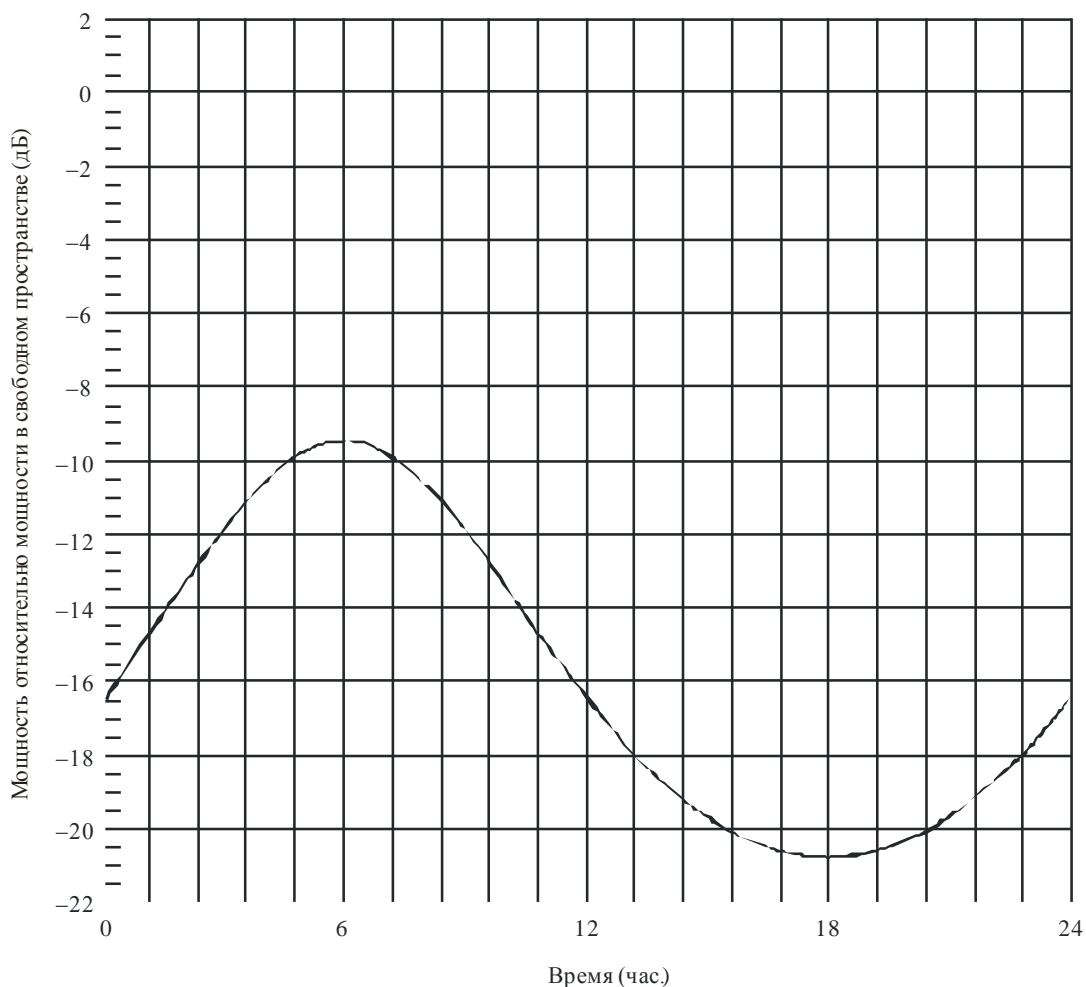
Эти широко распространенные практические меры обеспечивают наиболее высокие реально возможные значения ослабления сигналов за счет дифракции не только на трассах возможного действия помех в самой ФС, но и на трассах возможного действия помех между службами ФС и СРД. Тем не менее имеется возможность для улучшения, которого можно достичь путем:

- эффективного распространения соответствующей информации о проблеме возможных помех;
- простых легко выполнимых инструкций по достижению максимального ослабления сигнала за счет дифракции на трассах возможного действия помех, когда излучения ФС в ином случае будут превышать рекомендованный предельный уровень спектральной плотности э.и.и.м.

Установка антенн ФС на мачтах является наиболее неблагоприятным случаем с точки зрения помех, поскольку получаемое при этом ослабление за счет дифракции незначительно, если только трасса возможных помех не затеняется в зоне за мачтой естественным или искусственным препятствием. Такие потенциально мешающие линии (когда этого нельзя избежать по эксплуатационным соображениям) должны надлежащим образом учитываться, если излучения ФС в ином случае будут превышать рекомендованный предельный уровень спектральной плотности э.и.м. В этом случае важно также предусмотреть простые легко выполнимые инструкции, способствующие согласованию.

РИСУНОК 7

Суточные изменения мощности помех, принимаемых СРД на наклонной орбите $0,1^\circ$:
сдвиг местоположения СРД на орбите на $-0,1^\circ$ в плоскости угла места;
станция ФС находится на 45° с. ш.



F.1249-07

6 Резюме и выводы

Выбор мест расположения станций ФС для связи пункта с пунктом и их конфигурация при крупномасштабном развертывании сети, которое является типичным примером использования диапазона 26 ГГц, направлены на уменьшение помех внутри службы за счет ослабления сигнала из-за дифракции. Эти меры также помогают уменьшить возможные помехи между службами, создаваемые передающими станциями ФС приемнику геостационарного СРД, который следует по траектории космического аппарата на низкой околоземной орбите. В то время как "статический" случай помех внутри службы сводится к простому анализу, основанному на Рекомендации МСЭ-R P.526, случай помех между службами представляет намного более сложную проблему.

Представленный анализ первого порядка, направленный на обеспечение глубокого понимания важности затенения зоны Френеля в качестве фактора, который может привести к снижению предельных уровней спектральной плотности э.и.и.м. излучений станций ФС в направлении местоположений СРД на орбите, подтвердил наличие суточных изменений уровня ослабления сигнала за счет дифракции и их зависимость от номинального местоположения СРД по отношению к линии, соединяющей передающую антенну ФС и приемную антенну. В рассмотренных примерах номинальный уровень может соответствовать значению для свободного пространства или может быть на 16,5 дБ ниже уровня для свободного пространства. Это показывает, что допустимый уровень э.и.и.м. для станций ФС с применением затенения зоны Френеля должен определяться для каждой станции с учетом географических и геометрических факторов, оказывающих влияние на трассу между станцией ФС и СРД.

Следует отметить, что в тех случаях, когда орбитальная станция СРД находится в пределах главного луча передающей антенны станции ФС для связи пункта с пунктом, но затеняется зданием или другим топографическим объектом, вероятно, что другая часть дуги геостационарной орбиты будет видимой в пределах главного луча антенны ФС без какого-либо препятствия, так что работа станции ФС для связи пункта с пунктом будет ограничена требованиями п. 3 раздела *рекомендует*.
