



This electronic version (PDF) was scanned by the International Telecommunication Union (ITU) Library & Archives Service from an original paper document in the ITU Library & Archives collections.

La présente version électronique (PDF) a été numérisée par le Service de la bibliothèque et des archives de l'Union internationale des télécommunications (UIT) à partir d'un document papier original des collections de ce service.

Esta versión electrónica (PDF) ha sido escaneada por el Servicio de Biblioteca y Archivos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) a partir de un documento impreso original de las colecciones del Servicio de Biblioteca y Archivos de la UIT.

(ITU) للاتصالات الدولي الاتحاد في والمحفوظات المكتبة قسم أجراه الضوئي بالمسح تصوير نتاج (PDF) الإلكترونية النسخة هذه والمحفوظات المكتبة قسم في المتوفرة الوثائق ضمن أصلية ورقية وثيقة من نقلًا.

此电子版（PDF版本）由国际电信联盟（ITU）图书馆和档案室利用存于该处的纸质文件扫描提供。

Настоящий электронный вариант (PDF) был подготовлен в библиотечно-архивной службе Международного союза электросвязи путем сканирования исходного документа в бумажной форме из библиотечно-архивной службы МСЭ.



ХVII ПЛЕНАРНАЯ АССАМБЛЕЯ
ДЮССЕЛЬДОРФ, 1990



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

ОТЧЕТЫ МККР, 1990 г.

(ВКЛЮЧАЯ РЕШЕНИЯ)

ПРИЛОЖЕНИЕ К ТОМАМ IV И IX – ЧАСТЬ 2

**СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТ
И КООРДИНАЦИЯ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ
ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ
И РАДИОРЕЛЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ**



МККР МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ КОМИТЕТ ПО РАДИО



XVII ПЛЕНАРНАЯ АССАМБЛЕЯ
ДЮССЕЛЬДОРФ, 1990



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

ОТЧЕТЫ МККР, 1990 г.

(ВКЛЮЧАЯ РЕШЕНИЯ)

ПРИЛОЖЕНИЕ К ТОМАМ IV И IX – ЧАСТЬ 2

**СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТ
И КООРДИНАЦИЯ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ
ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ
И РАДИОРЕЛЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ**



МККР МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ КОМИТЕТ ПО РАДИО

ISBN 92-61-04204-X

ПРИЛОЖЕНИЕ К ЧАСТИ 2 ТОМОВ IV И IX

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТ И КООРДИНАЦИЯ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ
ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ И РАДИОРЕЛЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ

(4-я и 9-я Исследовательские комиссии)

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
План томов I—XV XVII Пленарной Ассамблеи МККР (см. тома IV или IX — Рекомендации)	
Распределение текстов XVII Пленарной Ассамблеи МККР в томах I — XV (см. тома IV или IX — Рекомендации)	
Содержание	I
Перечень текстов в порядке их нумерации	III
 <i>Раздел 4/9A — Условия совместного использования частот</i>	
Отчет 209-5 Совместное использование частот системами фиксированной спутниковой службы и наземными службами радиосвязи	1
Отчет 876 Совместное использование частот выше 40 ГГц системами фиксированной спутниковой и фиксированной служб	8
Отчет 1142 Совместное использование частот фиксированной службой и фиксированной спутниковой службой, использующей спутники на слегка наклонных геостационарных орбитах	15
Отчет 793-1 Обоснование критериев помех для цифровых систем фиксированной спутниковой службы, использующих полосы частот совместно с наземными системами	43
Отчет 877-1 Критерии помех для цифровых радиорелейных систем, использующих полосы частот совместно с фиксированной спутниковой службой	46
Отчет 1143 Совместное использование частот фиксированной спутниковой службой и фиксированной службой в соответствии с положениями Статьи 14 Регламента радиосвязи в Районе 2	52
Отчет 386-3 Определение мощности в любой полосе шириной 4 кГц, излучаемой в направлении на горизонт земными станциями фиксированной спутниковой службы, использующими совместно с наземными службами полосы частот ниже 15 ГГц	55
Отчет 387-6 Защита наземных радиорелейных систем прямой видимости от помех, создаваемых излучениями космических станций фиксированной спутниковой службы, в совместно используемых полосах частот между 1 и 23 ГГц	59
Отчет 1005 Совместное использование полос частот системами фиксированной службы и системами фиксированной спутниковой службы, содержащими сети, работающие в полосах частот, распределенных для основного направления (ОН) и реверсного направления (РН) передач	77

Отчет 790-1	Э.и.и.м. и пределы мощности наземных радиорелейных передатчиков, использующих совместно с цифровыми спутниковыми системами полосы частот от 11 до 14 ГГц и около 30 ГГц	84
Отчет 1006	Пределы э.и.и.м. фиксированной службы для защиты фидерных линий радиовещательных спутников на частотах около 18 ГГц	92
Отчет 393-4	Пересечения антенных лучей радиорелейных систем с орбитами, используемыми космическими станциями фиксированной спутниковой службы	94
Отчет 791-1	Совместное использование полос частот межспутниковой службой, фиксированной и подвижной службами	127

Раздел 4/9 В — Координация и расчеты помех

Отчет 382-6	Определение координационной зоны	133
Отчет 448-5	Определение потенциала помех между земными и наземными станциями	196
Отчет 388-6	Методы определения влияния помех на характеристики качества и готовность наземных радиорелейных систем и систем фиксированной спутниковой службы	205
Отчет 709-1	Рассмотрение связи между антенной земной станции и антенной наземной линии ..	245
Отчет 792-3	Расчет максимальной плотности мощности, усредненной в полосе шириной 4 кГц, для сигнала с угловой модуляцией	254
Отчет 449-1	Измеренные помехи в телевизионных системах с частотной модуляцией, совместно использующих частоты с системами фиксированной спутниковой службы или с наземными системами	258

Решения

Решение 87	Определение координационной зоны (Приложение 28 Регламента радиосвязи)	265
------------	---	-----

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕКСТОВ В ПОРЯДКЕ ИХ НУМЕРАЦИИ

ПРИЛОЖЕНИЕ К ЧАСТИ 2 ТОМОВ IV И IX

	Стр.
РАЗДЕЛ 4/9А: Условия совместного использования частот	1
РАЗДЕЛ 4/9В: Координация и расчеты помех	133

ОТЧЕТЫ	Раздел	Стр.	ОТЧЕТЫ	Раздел	Стр.
209-5	4/9А	1	791-1	4/9А	127
382-6	4/9В	133	792-3	4/9В	254
386-3	4/9А	55	793-1	4/9А	43
387-6	4/9А	59	876	4/9А	8
388-6	4/9В	205	877-1	4/9А	46
393-4	4/9А	94	1005	4/9А	77
448-5	4/9В	196	1006	4/9А	92
449-1	4/9В	258	1142	4/9А	15
709-1	4/9В	245	1143	4/9А	52
790-1	4/9А	84			

Примечание. — В данном перечне не воспроизводятся решения, которые уже представлены в содержании в порядке их нумерации.

2. Факторы, определяющие совместное использование частот

Определение возможности совместного использования частот двумя системами зависит от следующих факторов:

- максимально допустимой величины помех в телефонном, телевизионном или звуковом канале на выходе системы, подвергающейся помехам;
- числа конкретных путей распространения помех, между которыми должна распределяться суммарная допустимая величина помехи;
- отношения мощностей или спектральных плотностей мощности полезного и мешающего сигналов на входе приемника, при котором обеспечивается допустимая величина помехи на выходе приемника с учетом используемых типов модуляции;
- мощности или спектральной плотности мощности мешающего передатчика;
- потери передачи при распространении мешающего сигнала на трассе с учетом эффективного усиления антенн, основных потерь передачи и влияния поляризации;
- мощности или спектральной плотности мощности передатчика полезного сигнала;
- потери передачи на трассе распространения полезного сигнала с учетом эффективного усиления антенны и основных потерь передачи.

Максимальная допустимая величина помех в гипотетической эталонной цепи дана в Рекомендации 356 для систем фиксированной спутниковой службы и в Рекомендации 357 для радиорелейных систем прямой видимости.

3. Методы, позволяющие обеспечить совместное использование частот

Конкретными методами, позволяющими обеспечить совместное использование частот системами фиксированной спутниковой службы и наземными системами, являются:

- ограничение мощности, излучаемой радиорелейными передатчиками (см. Рекомендацию 406 и Отчет 393); в приложении I приводятся некоторые детали по этому вопросу;
- ограничение спектральной плотности потока мощности на поверхности Земли, создаваемой спутниками фиксированной спутниковой службы (см. Рекомендацию 358 и Отчет 387);
- специальный метод расчета расстояния, в пределах которого передатчики земных станций или передатчики наземных станций могут создавать неприемлемые помехи соответственно приемникам наземных станций или приемникам земных станций, использующим одни и те же полосы частот (см. Рекомендацию 359 и Отчет 382).

Конкретные пределы и методы расчета приведены в Статьях 27 и 28 и в Приложении 28 Регламента радиосвязи.

Некоторые детали, касающиеся возможностей совместного использования полос частот фиксированной спутниковой службой и тропосферными радиорелейными системами, даны в приложении II.

В приложении III даны также некоторые сведения по совместному использованию частот фиксированной спутниковой службой и наземной радиолокационной службой.

4. Компромиссы для совместного использования частот системами фиксированной спутниковой службы и радиорелейными системами

Качественные показатели как цели проектирования радиорелейных систем и систем фиксированной спутниковой службы определены в Рекомендациях 393 и 353 МККР соответственно для систем с ЧРК-ЧМ, а для систем, использующих ИКМ,— в Рекомендациях 594 и 522.

Эти Рекомендации представляют компромисс между предпочтительными нормами, которые должны быть достигнуты для телефонной цепи, и увеличением стоимости с ростом качества систем связи. По этой причине данные Рекомендации представляют собой первичную основу для общего проектирования наземных и спутниковых систем радиосвязи.

Общее допустимое ухудшение качественных характеристик любой системы должно распределяться между:

- тепловым шумом,
- помехами внутри системы и
- помехами от других систем, использующих ту же полосу частот.

Может быть достигнута согласованность в распределении помех, если соответствующие Рекомендации будут учитывать влияние помех на общую стоимость систем, испытывающих взаимные помехи. Подробное рассмотрение этого метода приводится в работе Мэрфи [1982] и в документах МККР [1978-82]. Примеры применения этого метода кратко изложены в приложении IV.

Хотя не всегда можно легко применить данный метод в случае, если затронута не одна администрация, все же оправдать его рассмотрение может возможная экономия общей стоимости.

ССЫЛКИ

MURPHY, J. [September-October, 1982] Determination of minimum cost interference between services sharing the same frequency bands. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 37, 9—10, 413—424.

Документы МККР

[1978-82]: 4/344 (Rev. 1), 9/255 (Rev. 1) (Австралия).

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ЗАЩИТА КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ ОТ ПОМЕХ, СОЗДАВАЕМЫХ НАЗЕМНЫМИ РАДИОРЕЛЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ В ПОЛОСАХ СОВМЕСТНО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЧАСТОТ ВЫШЕ 1 ГГц

Рассмотрение ограничения мощности наземного передатчика связывается с двумя возможными причинами:

- помехами, воздействующими на спутник, в основном луче антенны наземного радиорелейного передатчика;
- помехами, воздействующими на спутник от излучения боковых лепестков антенн большого числа наземных станций, находящихся в зоне покрытия спутника.

Первая причина приводит к ограничению максимальной эквивалентной изотропно излучаемой мощности (э. и. и. м.) наземных станций, антенны которых направлены близко к геостационарной орбите. Вторая причина приводит к ограничению максимальной мощности, подводимой к антеннам наземных станций.

1. Ограничение э. и. и. м.

Для спутника, находящегося в зоне основного луча антенны наземной станции, создающей помехи, эта станция будет расположена на видимом со спутника горизонте. Допустимая э. и. и. м. будет зависеть, в частности, от коэффициента усиления спутниковой антенны в направлении на горизонт, который в общем случае будет значительно меньше коэффициента усиления в главном направлении.

Другими параметрами спутника, которые учитываются при расчетах, являются: шумовая температура приемника, количество телефонных каналов и используемая степень рассеяния энергии.

2. Ограничение мощности, подводимой к антенне

Коэффициент усиления антенны наземной станции вне ее основного луча существенно не зависит от коэффициента усиления в основном луче. Следовательно, когда спутник не находится в зоне основного луча антенны, помехами можно управлять скорее путем ограничения суммарной мощности, подводимой к антенне, чем ограничением э. и. и. м.

Суммарные помехи, воздействующие через главный лепесток спутниковой антенны, зависят поэтому от количества наземных станций, находящихся в зоне покрытия спутника, и от среднего усиления их антенн в направлении на спутник. Другие параметры спутника, которые учитываются при расчетах, упомянуты в предыдущем разделе.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОС ЧАСТОТ СИСТЕМАМИ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ И НАЗЕМНЫМИ ТРОПОСФЕРНЫМИ РАДИОРЕЛЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ

1. Введение

В этом приложении исследуются условия, при которых системы фиксированной спутниковой службы и тропосферные системы могут совместно использовать одни и те же полосы частот, не создавая чрезмерных взаимных помех.

2. Тропосферные радиорелейные системы

Тропосферные системы характеризуются большим разбросом параметров: например, мощность передатчиков может изменяться от нескольких сотен ватт до 50 кВт, диаметры антенны — от 3 до 35 м, емкость в основной полосе — от одного телефонного до одного телевизионного канала, коэффициент шума приемников — от 1 до 12 дБ. Выбирать наиболее подходящие параметры для каждой определенной системы, а иногда и для отдельной линии связи необходимо с учетом экономических требований. Рабочие запасы, которые могли бы обеспечить стандартизацию, оказываются либо технически недостижимыми, либо экономически неприемлемыми.

Сколь-либо широкое использование в тропосферных радиорелейных системах параллельных радиочастотных каналов, как в системах прямой видимости, мало вероятно.

3. Замечания, касающиеся геометрических соотношений

В Отчете 393 приведены геометрические соотношения, определяющие подверженность спутников воздействию лучей антенн наземных радиорелейных станций. Хотя более узкие лучи антенн тропосферных станций уменьшают вероятность освещения различных систем спутниковых орбит, большие мощности передатчиков, чувствительность приемников и усиление антенн увеличивают вероятность значительных помех от таких лучей и даже от основных боковых лепестков.

Кроме того, тропосферные линии часто используются для связи между малыми и далеко разнесенными островами, а также в других подобных случаях, что ограничивает выбор возможных направлений для трасс и мешает, таким образом, избежать направления антенн в сторону орбиты.

4. Замечания, касающиеся помех

4.1. Помехи спутникам и от спутников

Эквивалентная изотропно излучаемая мощность станции тропосферной системы может быть порядка 85—90 дБВт, то есть может незначительно отличаться от э. и. и. м. типичной земной станции. Следовательно, на спутнике, попавшем в главный лепесток антенны тропосферной станции, будут приниматься полезный и мешающий сигналы с приблизительно одинаковыми мощностями, если совместно используются частоты для направления Земля-космос. Если будут совместно использоваться частоты для направления космос-Земля, то мешающий сигнал, принимаемый приемником тропосферной системы, будет около —110 дБВт, то есть того же порядка, что и средняя величина полезного сигнала, и, следовательно, практически вызовет нарушение связи.

4.2. Помехи земным станциям и от земных станций

Проблема координационного расстояния между земными станциями и тропосферными станциями существенно подобна проблеме координационного расстояния между земными станциями и станциями прямой видимости, за исключением того, что будут иметь место более значительные основные потери передачи на трассе. Потери, требующиеся для того, чтобы сделать помехи незначительными, колеблются приблизительно в пределах от 190 дБ, когда антенны не наведены друг на друга, до 300 дБ, когда антенны обеих станций направлены друг на друга (совпадают по азимуту, но находятся на расстоянии, превышающем расстояние прямой видимости).

Следует отметить, что значительно больше известно о падении сигнала при тропосферном распространении на линии космос—Земля, чем на линии Земля—космос, что имеет большое значение при оценке координационного расстояния. Значительные отклонения потерь при тропосферном распространении от статистических медианных величин могут быть вызваны образованием атмосферных волноводов из-за температурных инверсий, что, как известно, вызывает увеличение сигналов, принимаемых на трассах за пределами горизонта на 60—70 дБ относительно медианных значений в течение весьма длительного времени. Топографические особенности местности ниже зоны рассеяния могут создавать атмосферные волноводы на конкретных трассах со значительно большим преобладанием, чем в среднем для рассматриваемого района или для района данного типа.

Измерение потерь распространения на трассах возможного распространения помех рекомендуется проводить в то время, когда температурные инверсии оказываются наиболее вероятными. Если основные потери передачи превышают 250 дБ, их трудно измерить с помощью перевозимого оборудования.

Для геостационарных спутников задача координации в некоторой мере упрощается в связи с тем, что антенна земной станции всегда имеет одно направление, а не несколько, как это имеет место, когда она следит за движущимся спутником.

5. Выводы

5.1 Как представляется, проблема координации в большинстве случаев, встречающихся на практике, может быть решена. В особо трудных ситуациях она могла бы быть упрощена, если бы имелась несовмещенная полоса частот, в которую можно было бы перевести частоты мешающей линии связи.

5.2 Совместное использование полос частот с системой геостационарных спутников потребовало бы ограничения на небольшой части земной поверхности диапазона разрешенных азимутальных направлений для тропосферных линий. По-видимому, степень этого ограничения не будет настолько велика, чтобы препятствовать совместному использованию полос частот.

5.3 Системы со спутниками на случайных наклонных орбитах в настоящее время требуют таких существенных ограничений диапазона разрешенных азимутальных направлений для тропосферных линий на большей части земного шара, что совместное использование частот оказывается невозможным.

ПРИЛОЖЕНИЕ III

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБОЙ И НАЗЕМНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЛУЖБОЙ

В соответствии с Таблицей распределения частот фиксированная спутниковая служба и наземная радиолокационная служба имеют некоторые распределения в одних и тех же полосах частот, особенно выше 50 ГГц.

На совмещение частот влияют три основных фактора: управление частотой, географические особенности и методы уменьшения помех. В Отчетах 827 и 828 * соответственно рассматриваются эти факторы и излагаются вопросы использования спектра частот в радиолокационной службе, а также теоретические и экспериментальные результаты совместного использования спектра частот системами ЧРК-ЧМ и радиолокационными системами с гашением импульса.

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ ПОМЕХ МЕЖДУ НАЗЕМНЫМИ РАДИОРЕЛЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ И СПУТНИКОВЫМИ СЛУЖБАМИ

1. Методология

Построение модели систем, испытывающих взаимные помехи, является первым этапом метода оптимизации. Затем стоимость увязывается с параметрами модели, которые могут управляться проектировщиками. Это осуществляется путем применения соответствующих уравнений при расчете стоимости на основе имеющихся данных. Далее полученные результаты складываются для определения суммарной стоимости всех рассматриваемых систем.

Для каждой системы имеются нормы общих качественных показателей; они включают ухудшение качества, вызванное всеми источниками. Они могут использоваться, чтобы ограничить или сделать зависимыми некоторые из параметров проекта. (Зависимые параметры имеют фиксированные величины, тогда как всем другим параметрам величины присваиваются.) Другие параметры можно сделать зависимыми путем использования уравнений распространения радиоволн для передачи сигналов в каждой системе и для распространения помех между системами. Тогда суммарная стоимость будет функцией остальных независимых переменных.

При осуществлении программы оптимизации может быть найдена общая минимальная стоимость путем изменения значений независимых переменных. Полученный в результате набор параметров является оптимальным, поскольку они соответствуют минимальной общей стоимости. Исходя из полученных параметров, можно рассчитать уровень помех. Это будет предпочтительный уровень помех, который должен быть принят как цель проектирования, поскольку он связан с оптимальным построением всей системы. Выбор какого-либо другого уровня помех потребует изменения независимых переменных и, следовательно, увеличения суммарной стоимости.

2. Результаты исследования одного из примеров

На рис. 2 показана типичная модель системы, создающей помехи. Взаимные помехи между наземной системой и космическим сегментом обычно устраняются при надлежащей ориентации антенны радиорелейной системы по отношению к геостационарной орбите. Предполагается, что земная станция, использующая сигналы ОКН-ФМ, испытывает помехи от той секции радиорелейной системы, где расположен модем (как определено в Рекомендации 392). В данной модели секция модема состоит из семи трасс длиной по 40 км, а земная станция расположена посередине этой секции.

Предполагается, что долговременные помехи (20% времени) возникают только между ближайшими парами передатчиков или приемников секции модема и приемником или передатчиком земной станции. Предполагается, что кратковременные помехи возникают только между земной станцией и крайними ретрансляторами с обеих сторон секции модема, R_1 и R_7 . Преобладающим видом распространения является волноводное распространение.

В обоих случаях, при помехах от радиорелейной системы земной станции и наоборот, необходимо оптимизировать всю секцию модема в отношении помех одному ретранслятору и от него. Поскольку стоимость радиолинии является вогнутой функцией шума в основной полосе в случае аналоговой радиорелейной системы, то дешевле нейтрализовать влияние помех либо на земную станцию, либо на радиорелейную систему путем небольшого улучшения каждого ретранслятора, чем подстройкой мешающей или подверженной помехе линии [Murphy, 1982].

* Последнее предложение раздела «Выводы» Отчета 828 не должно учитываться, потому что такая ситуация совмещения частот не может иметь места в соответствии с Таблицей распределения частот Регламента радиосвязи.

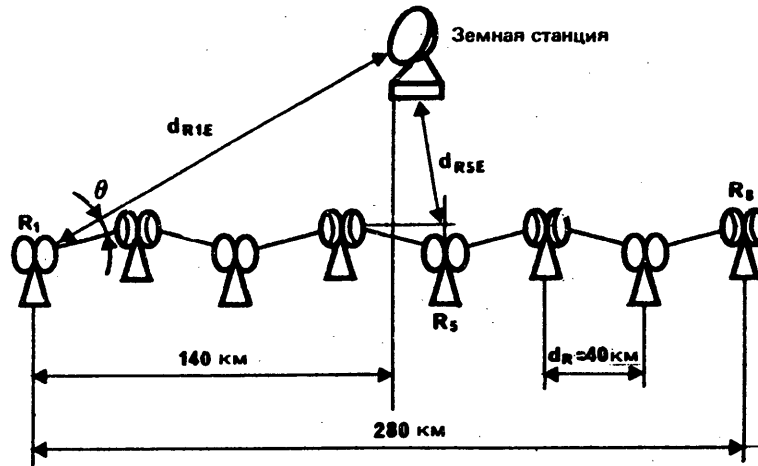


РИСУНОК 2 — Модель земной станции и наземной станции радиосвязи, испытывающих взаимные помехи

Чтобы определить общую стоимость, требуется ряд соответствующих уравнений стоимости. Ряд таких уравнений дан в работе Мэрфи [1982]. На рис. 3 показано основанное на этих уравнениях изменение общей стоимости систем, смоделированных на рис. 2, в зависимости от двух наиболее важных независимых параметров.

На рис. 4 показано, что отношение помех в оптимальном случае приблизительно пропорционально произведению G_{R5E} (коэффициент усиления антенны мешающего ретранслятора в направлении на земную станцию) на G_{ER5} (коэффициент усиления антенны земной станции в направлении R_5), но оптимальная стоимость C_0 практически не зависит от этого произведения, если оно не превышает значения примерно 40 дБ. На практике это означает, что если произведение коэффициентов усиления антенн не превышает этого значения, то величина J представляет собой случайно возникающую величину при оптимизации двух систем в присутствии кратковременных помех. Следовательно, это значение является расчетным значением помех.

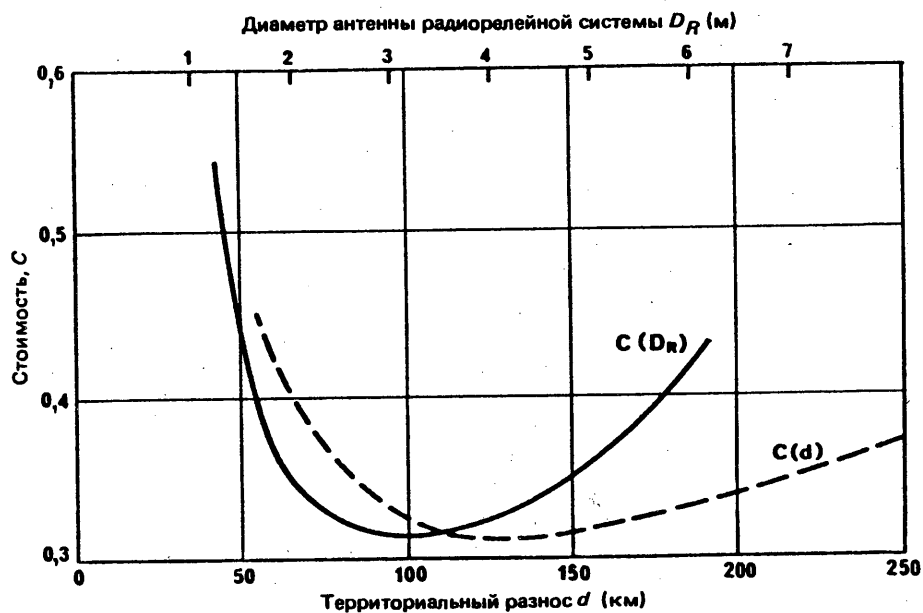


РИСУНОК 3 — Изменение общей стоимости систем с территориальным разном d и диаметром антенны радиорелейной системы D_R . Другие независимые переменные параметры поддерживаются на их оптимальных значениях

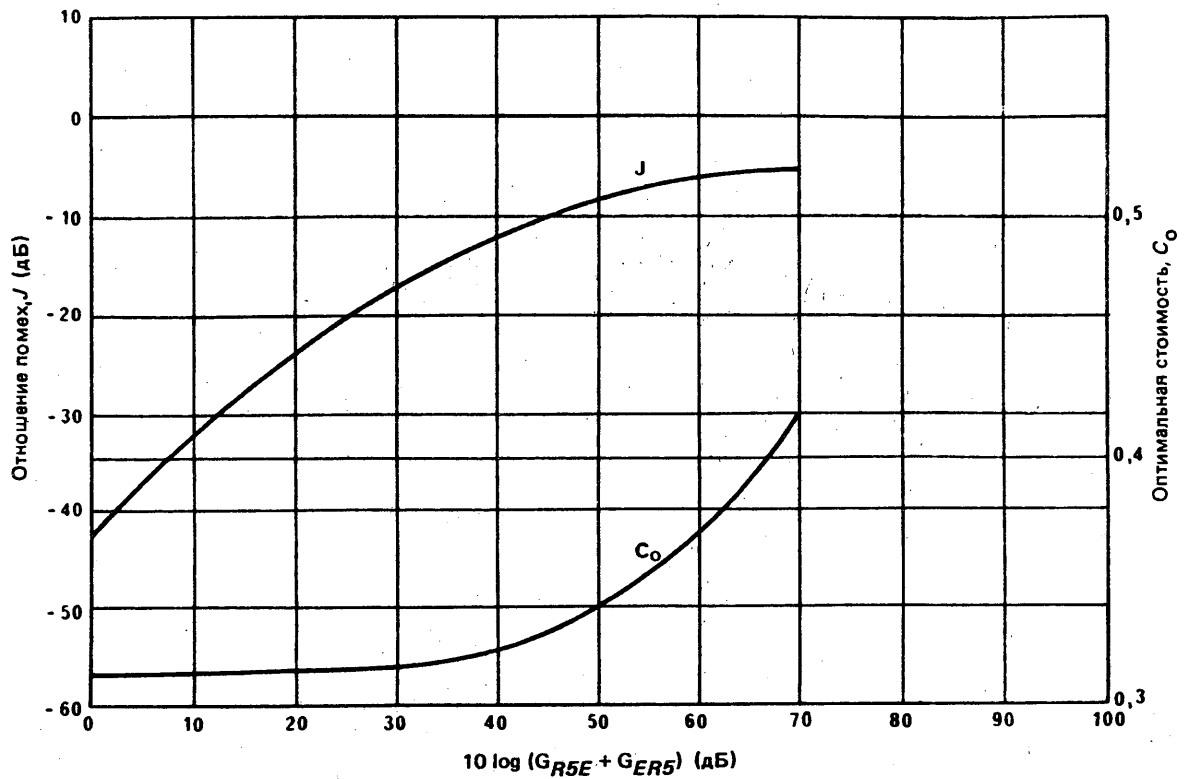


РИСУНОК 4 — Изменение стоимости систем и оптимальной помехи в зависимости от произведения коэффициентов усиления антенн земной станции и ретранслятора, создающего долговременные помехи

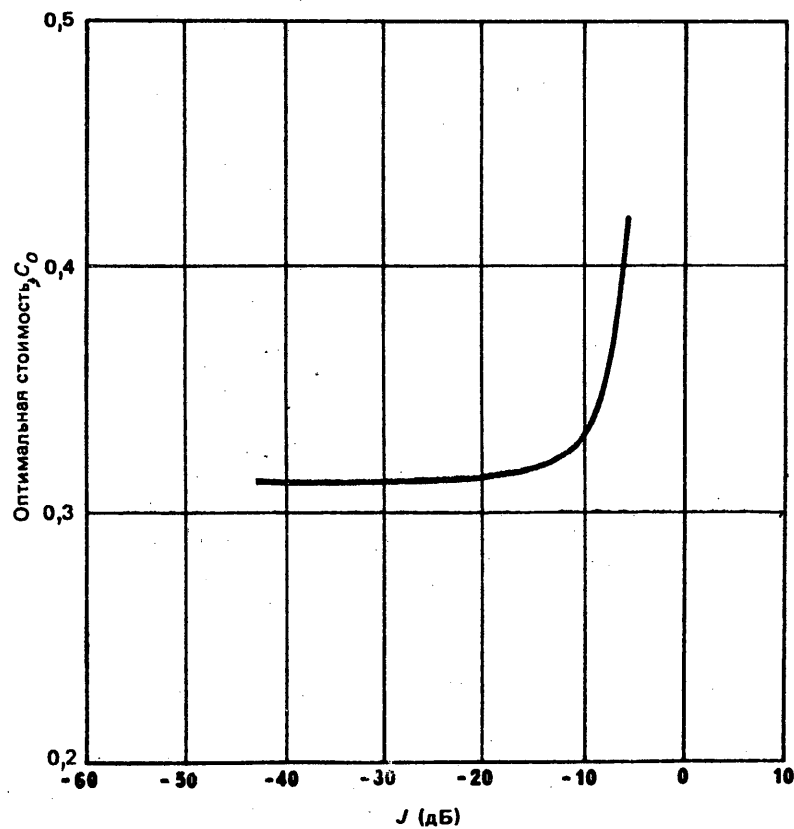


РИСУНОК 5 — Соотношение между оптимальной стоимостью и уровнем помех, определяемое коэффициентами усиления антенн, участвующих в передаче долговременных помех

При более высоких значениях произведения коэффициентов усиления антенн, когда стоимость становится зависимой от уровня помех, оптимальная величина помех приблизительно постоянна. На рис. 5 примерно при -7 дБ хорошо виден резкий излом кривой, отражающей оптимальную стоимость в зависимости от помех. Эта величина, при которой значительно увеличивается стоимость, является *максимально допустимой величиной* помехи.

ССЫЛКИ

MURPHY, J. [September-October, 1982] Determination of minimum cost interference between services sharing the same frequency bands. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 37, 9-10, 413-424.

ОТЧЕТ 876

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОС ЧАСТОТ ВЫШЕ 40 ГГц СИСТЕМАМИ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ И ФИКСИРОВАННОЙ СЛУЖБ

(Вопросы 32/4 и 17/9)

(1982)

1. Введение

В настоящем Отчете представлены результаты исследований условий совместного использования полос частот выше 40 ГГц фиксированной спутниковой и фиксированной службами. Четыре пути распространения помехи, рассматриваемые в настоящем Отчете, показаны на рис. 1 Отчета 209. В этих случаях помеха, создаваемая наземной станцией и действующая на приемник, установленный на спутнике, не принимается в расчет, поскольку величина э. и. и. м. наземных станций будет очень незначительной, за исключением случая, когда основной луч антенны спутника направлен на основной лепесток антенны наземной станции, что случается крайне редко. Поэтому ниже анализируются три других пути распространения помехи. Применительно к указанным полосам частот как для наземных, так и для спутниковых систем рассматривается только цифровая модуляция.

2. Основные положения для расчета помехи

2.1 Модель системы

Установить параметры системы ввиду отсутствия Рекомендаций или Отчетов относительно наземных радиорелейных систем и спутниковых служб, работающих в полосах частот выше 40 ГГц, представляется затруднительным. В нижеследующем анализе совместимости возможные максимальные значения э. и. и. м. приписываются мешающему передатчику, а возможные значения чувствительности — приемнику, при этом учитывается предсказуемое совершенствование и развитие как спутниковых, так и наземных систем.

Пример параметров системы приводится в приложении I, пункт 1. Приведенные параметры могут соответствовать конфигурации системы, подверженной помехам в большей степени, чем это встречается на практике.

2.2 Принятые характеристики распространения

На частотах выше 40 ГГц сигналы ослабляются кислородом и водяными парами даже при ясной погоде, а при дожде особенно. В Отчете 719 предлагается пользоваться отношением $1/7,5$ от обычного значения сигнала для учета ослабления сигнала из-за водяного пара, при этом ослабление оказывается пропорциональным концентрации водяного пара ρ . Таким образом, значение ρ должно приниматься равным 1 г/м^3 . Однако это условие представляется слишком строгим, и поэтому значение ρ принимается равным 3 г/м^3 . Были выбраны полосы частот 40, 100 и 230 ГГц, поскольку воздействие помехи на этих частотах вследствие низкого атмосферного поглощения является значительным.

2.3 Максимальный допустимый уровень помехи

При расчете максимального допустимого значения плотности потока мощности помехи от спутниковой или наземной службы максимальный допустимый уровень помехи берется на 10 дБ меньшим, чем общий уровень шума для заданного отношения сигнал/шум. Поскольку в указанных полосах частот наземные радиорелейные системы и спутниковые службы будут, вероятно, использовать цифровую модуляцию, за эталонную принимается полоса пропускания, равная 1 МГц.

3. Предельные значения плотности потока мощности от спутниковой станции

В настоящем разделе рассматривается помеха от установленного на спутнике передатчика наземному приемнику. Поскольку эффективная длина пути распространения при ливне с ураганом для большинства стран превосходит 4 км [Отчет 564-1 (Киото, 1978), рис. 1 и 2, угол места от 40 до 50°], а длина участка наземных радиорелейных систем оказывается, как правило, меньше 4 км, помеха от спутника во время дождя будет более ослабленной, чем полезный наземный радиосигнал. В связи с этим помеха в условиях дождя не исследуется.

Рассмотрим прежде всего случай, когда помеха находится в пределах приемного луча. Предположим, что спутники находятся на геостационарной орбите с разнесом 3°; тогда над горизонтом может быть видно около 50 спутников. Поскольку ширина луча приемных антенн менее 3°, предполагается, что в пределах приемного луча находится только один спутник, а все остальные — вне луча. Совокупностью помех от этих спутников можно пренебречь, так как коэффициент направленного действия антенны при углах, превышающих более чем на 3° ширину приемного луча, характеризуется величиной выше 25 дБ, а суммарная плотность потока мощности примерно от 50 спутников принимается большей на 14 дБ плотности потока от каждого спутника (уменьшение путем усреднения составляет —3 дБ). Когда большинство наземных приемных антенн имеет ширину приемного луча $\pm 1^\circ$, а наклон пути распространения составляет менее 4°, допустимое максимальное значение плотности потока мощности в условиях свободного пространства при углах места θ меньше 5° будет —101, —96 и —86 дБ(Вт/(м² · МГц)) на частотах 40, 100 и 230 ГГц соответственно (см. пункт 2.1 приложения I к настоящему Отчету).

Далее рассмотрим случай, когда помеха находится вне приемного луча. Как указывалось выше, суммарная величина помех примерно от 50 спутников на 14 дБ выше величины помехи от одного спутника. Принимается, что величина коэффициента направленного действия наземной антенны будет выше 45 дБ, а величина коэффициента направленного действия спутниковой антенны — 0 дБ. При этих допущениях допустимое максимальное значение плотности потока мощности на поверхности Земли от одного любого спутника в условиях свободного пространства при угле места θ больше 25° будет составлять —73, —70 и —74 дБ(Вт/(м² · МГц)) на частотах 40, 100 и 230 ГГц соответственно.

С учетом вышеизложенного можно вычислить плотность потока мощности, создаваемой на поверхности Земли излучениями от любой космической станции при условии распространения в свободном пространстве. Однако в настоящее время трудно определить фиксированное ограничение плотности потока мощности, поскольку величина коэффициента затухания в водяных парах требует дальнейшего изучения. Предлагаемые временные величины приведены в таблице IV, где принято, что концентрация водяных паров составляет $\rho = 3$ г/м³. Если принять, что ρ равно 1 г/м³, то допустимая максимальная плотность потока мощности в пределах луча антенны в полосе частот 230 ГГц изменится до величины —100 дБ(Вт/(м² · МГц)), причем допустимая максимальная плотность потока мощности вне луча антенны изменится менее чем на 2 дБ.

4. Расстояние разнеса между земной спутниковой и наземной радиорелейной станциями

В настоящем разделе рассматривается минимальное расстояние разнеса между земной и наземной радиорелейными станциями, необходимое для предотвращения превышения допустимого уровня помехи как при дожде, так и без дождя.

Принимается, что на частотах выше 40 ГГц угол места антенны земной станции будет больше 30°, с тем чтобы избежать значительного атмосферного поглощения и затухания во время дождя. При этом условии усиление антенны в горизонтальном направлении становится остаточным усилением, величина которого принимается равной —10 дБи, однако в некоторых случаях угол места может быть меньшим, поэтому в другом примере его величина принимается равной 10°. Уравнение (1) в Отчете 614 используется для определения усиления антенны в боковом лепестке.

В условиях без дождя и при дожде допустимые уровни помехи соответствуют коэффициентам ошибок 10^{-11} или 10^{-3} соответственно. Употребляемое в расчетах значение величины ослабления из-за дождя определяется путем деления запаса на замирание на длину наземного участка или на эффективную длину спутникового пути распространения. Это означает, что интенсивность дождя в рассматриваемой зоне считается постоянной и ослабление мешающего сигнала вследствие дождя учитывается при этой интенсивности дождя. Рассеяние осадками не учитывается, поскольку рассеянный сигнал ослабляется осадками и мало вероятно, чтобы пути распространения взаимно пересекались. Тем не менее этот случай требует дальнейшего изучения. Используемые здесь возможные параметры системы приводятся в приложении I.

Из вышеприведенных рассуждений следует, что даже для частоты 40 ГГц, когда требуется наибольшее расстояние разнеса, минимальное расстояние составляет около 52 км при помехе, находящейся в пределах $\pm 1^\circ$ от оси основного лепестка наземной антенны, и около 1 км при помехе, проходящей под углом больше $\pm 40^\circ$ от оси, при этом предполагается, что угол места антенны земной станции больше 30°. Для угла места 10° минимальные расстояния разнеса будут 127 и 1,7 км соответственно. Метод расчета и точные результаты приводятся в приложении I.

5. Заключение

Проанализирована возможность совместного использования полос частот выше 40 ГГц системами фиксированной спутниковой и фиксированной служб. Условие для совместного использования полос частот предусматривает ограничения максимального значения плотности потока мощности, создаваемой любой космической станцией на поверхности Земли при распространении в свободном пространстве. Временные значения этих ограничений приводятся в таблице IV. Они могут применяться к возможным будущим спутниковым системам.

Необходимое расстояние разнеса между наземной радиорелейной станцией и земной станцией представляется очень малым.

Из вышеприведенных рассуждений следует, что совместное использование полос частот выше 40 ГГц системами фиксированной спутниковой и фиксированной служб представляется осуществимым с учетом реальной ситуации; в то же время необходимы дальнейшие исследования с целью определения параметров распространения, то есть коэффициентов ослабления при рассеянии осадками и ослабления водяными парами, особенно для случая, когда направление основного луча антенны спутника совпадает с основным лучом наземной антенны.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

1. Предполагаемые параметры системы

1.1 Параметры систем, подверженных помехам

Параметры наземной радиорелейной системы приведены в таблице I. Параметры земной спутниковой станции приводятся в таблице II. Атмосферное поглощение полезного сигнала спутниковой системы рассчитывается при предположении, что ρ (концентрация водяного пара, г/м³) = 3 г/м³, угол места $\theta = 45$ и 10° , а эффективные длины путей в атмосфере составляют 4 и 2 км для кислорода и водяного пара соответственно.

1.2 Параметры систем, создающих помехи

Предполагается, что параметры наземного радиопередатчика соответствуют указанным в таблице III. Считается, что выходная мощность передатчика падает с ростом частоты в пропорции 6 дБ на октаву, а ширина излучаемой полосы берется более узкой, чем указано в таблице I, поскольку плотность потока мощности возрастает.

Далее предполагается, что мощность передатчика земной спутниковой станции составляет 10 дБ(Вт/МГц), независимо от частоты, а коэффициент усиления антенны в горизонтальном направлении постоянный на уровне —10 дБи при угле места 45° . Для угла места 10° коэффициент усиления антенны в горизонтальном направлении является функцией азимутального угла вне луча. В нижеследующих расчетах предполагается, что диаграмма антенны наземной станции в вертикальной плоскости включает главную ось антенны земной станции (азимутальный угол вне луча = 0°). Это — наихудший случай.

2. Расчет помехи

2.1 Помеха от космической станции наземной радиорелейной станции

2.1.1 Помеха в пределах приемного луча (в условиях без дождя: угол места $\theta = 4^\circ$)

Максимальное значение плотности потока мощности в условиях распространения в свободном пространстве определяется из уравнения (1):

$$pfd_{maxin} = P_i + L_f + L_{at}(\theta) - 10 \log A_e - 10 \log B, \quad (1)$$

где

pfd_{maxin} : максимальная плотность потока мощности в пределах луча (дБ(Вт/(м² · МГц)));

P_i : допустимая мощность помехи (дБВт);

L_f : потери в приемном фидере (дБ);

$L_{at}(\theta)$: атмосферное поглощение (дБ) (угол места $\theta = 4^\circ$, концентрация водяного пара $\rho = 3$ г/м³);

A_e : эффективная площадь приемной антенны (м²);

B : ширина принимаемой полосы (МГц).

Полученные результаты: —101,3, —95,5 и —86,1 дБ(Вт/(м² · МГц)) для частот 40, 100 и 230 ГГц соответственно. Эти значения действительны вне основного луча антенны космической станции.

ТАБЛИЦА I — Возможные параметры радиорелейной системы фиксированной службы, подверженной помехам

Модуляция	4-позиционная фазовая манипуляция		
Ширина полосы (МГц)	200		
Коэффициент шума (дБ)	5		
Потери в фидере (дБ) (на каждой станции)	2,5		
Необходимое отношение сигнал/шум (10^{-11}) (дБ)	21		
Частота (ГГц)	40	100	230
Выходная мощность (дБВт)	—10	—18	—25
Диаметр антенны (м) ($\eta = 0,6$)	0,6	0,6	0,3
Э.и.и.м. (дБВт)	33,5	33,5	27,5
Длина участка (км)	4	3	3
Допустимая мощность помехи без дождя (дБВт)	—91,0	—88,5	—100,3
Необходимое отношение сигнал/шум (10^{-3}) (дБ)	14	14	14
Допустимая мощность помехи при дожде (дБВт)	—126	—126	—126
Запас на замирание (дБ)	42,0	44,5	32,7

ТАБЛИЦА II — Возможные параметры спутниковой земной станции, подверженной помехам

Модуляция		4-позиционная фазовая манипуляция		
Ширина полосы (МГц)		100		
Шумовая температура (К)		30		
Диаметр антенны (м)		3		
Потери в фидере (дБ)		2,5		
Необходимое отношение сигнал/шум (10^{-11}) (дБ)		21		
Э.и.и.м. космической станции (дБВт)		70		
Расстояние (км)		38 000		
Частота (ГГц)		40	100	230
Атмосферное поглощение ($\rho = 3$) (дБ)	$\theta = 45^\circ$	0,3	0,6	2,1
	$\theta = 10^\circ$	1,0	2,4	8,7
Допустимая мощность помехи без дождя (дБВт)	$\theta = 45^\circ$	—120,1	—120,4	—121,9
	$\theta = 10^\circ$	—120,8	—122,2	—128,5
Необходимое отношение сигнал/шум (10^{-3}) (дБ)		14	14	14
Допустимая мощность помехи при дожде (дБВт)		—144	—144	—144
Запас на замирание (дБ)	$\theta = 45^\circ$	31,2	30,8	29,3
	$\theta = 10^\circ$	30,4	29,0	22,8

ТАБЛИЦА III — Возможные параметры радиорелейной системы фиксированной службы, создающей помехи (наихудший случай)

Частота (ГГц)	40	100	230
Выходная мощность (дБВт)	4	—4	—11
Диаметр передающей антенны (м)	1	1	1
Усиление антенны (дБ) ($\eta = 0,6$)	50	58	65
Э.и.и.м. (дБВт)	54	54	54
Ширина полосы (МГц)	100	100	100

2.1.2 Помеха вне приемного луча (в условиях без дождя: угол места $\theta = 25^\circ$).

Максимальное значение плотности потока мощности в условиях распространения в свободном пространстве определяется из уравнения (2):

$$pfd_{maxoff} = P_i + L_f + L_{at}(\theta) - 10 \log A_e - 10 \log B - 17 + 3 + 45, \quad (2)$$

где

$L_{at}(\theta)$: атмосферное поглощение (дБ) (угол места $\theta = 45^\circ$, $\rho = 3 \text{ г/м}^3$);

17 дБ: 50 спутников;

—3 дБ: предполагаемое значение коэффициента уменьшения при усреднении;

45 дБ: направленность наземной антенны при углах вне луча, превышающих 20° .

Полученные результаты: —72,5, —69,7 и —73,9 дБ(Вт/(м² · МГц)) для частот 40, 100 и 230 ГГц, соответственно. Эти значения действительны на основной оси антенны космической станции.

В таблице IV приводятся выведенные при сделанных выше допущениях предлагаемые значения предела плотности потока мощности, создаваемой на поверхности Земли излучениями от любой космической станции при условии распространения в свободном пространстве. В промежутке значений θ , лежащих между 5° и 25° , допустимая величина плотности потока мощности определяется линейной зависимостью от угла прихода и может применяться для более низких частот.

Допустимые величины э. и. и. м. для спутниковых космических станций, соответствующие вышеприведенным значениям, составляют 80, 82 и 82 дБ(Вт/МГц) для частот 40, 100 и 230 ГГц, соответственно. Представляется, что эти значения достаточно высоки, даже с учетом возможных будущих усовершенствований техники спутниковой связи.

ТАБЛИЦА IV — Предлагаемые временные пределы плотности потока мощности на поверхности Земли

Полоса частот (ГГц)	Предел плотности потока мощности (дБ(Вт/(м ² · МГц)))		
	$\theta \leq 5^\circ$	$5^\circ < \theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta \leq 90^\circ$
40—100	—102	—102 + ($\theta - 5$)	—82
100—275	—100	—100 + ($\theta - 5$)	—80

Примечание.— Ограничения плотности потока мощности не требуются в полосах частот поглощения около 60, 120 и 180 ГГц.

2.2 Расстояние разноса между земной станцией и наземной радиорелейной станцией

Необходимое расстояние разноса d определяется из уравнения (3), ниже. Параметры даны в таблицах I, II и III, а также в пункте 1.2 приложения I.

$$P_{ii} + G_{ai} - 10 \log 4\pi(1000 d)^2 = P_i + L_f + K \cdot d - 10 \log A_e - 10 \log B + A_r, \quad (3)$$

где

- P_{ii} : выходная мощность мешающего передатчика (дБ(Вт/МГц));
- G_{ai} : усиление передающей антенны для мешающего сигнала в направлении на приемник, подверженный помехе (дБ);
- d : необходимое расстояние разноса (км);
- P_i : допустимая мощность помехи в условиях без дождя или с дождем (дБВт);
- L_f : потери в приемном фидере (дБ);
- K : коэффициент атмосферного поглощения ($\rho = 3 \text{ г/м}^3$) в условиях без дождя или коэффициент ослабления в дожде в условиях с дождем (дБ/км);
- A_e : эффективная площадь приемной антенны (м^2);
- B : ширина принимаемой полосы (МГц);
- A_r : направленность приемной антенны в направлении φ на передатчик мешающего сигнала (дБ).

Необходимые зоны разноса в условиях без дождя и с дождем для наземной приемной станции (рис. 1) и наземной передающей станции (рис. 2) взаимно перекрываются на каждой из частот.

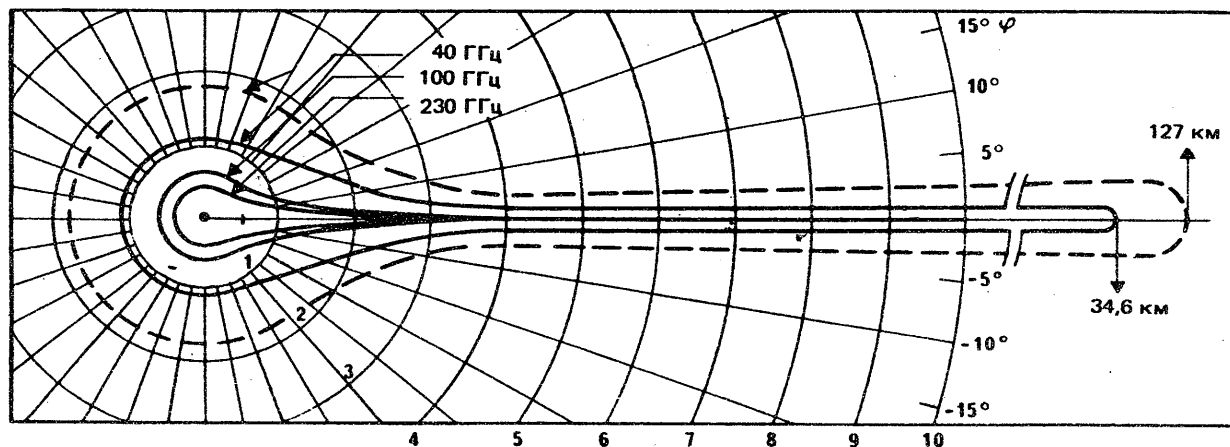


РИСУНОК 1 — Необходимый разнос для наземной приемной станции

- угол места антенны земной станции 45°
- 10° на частоте 40 ГГц

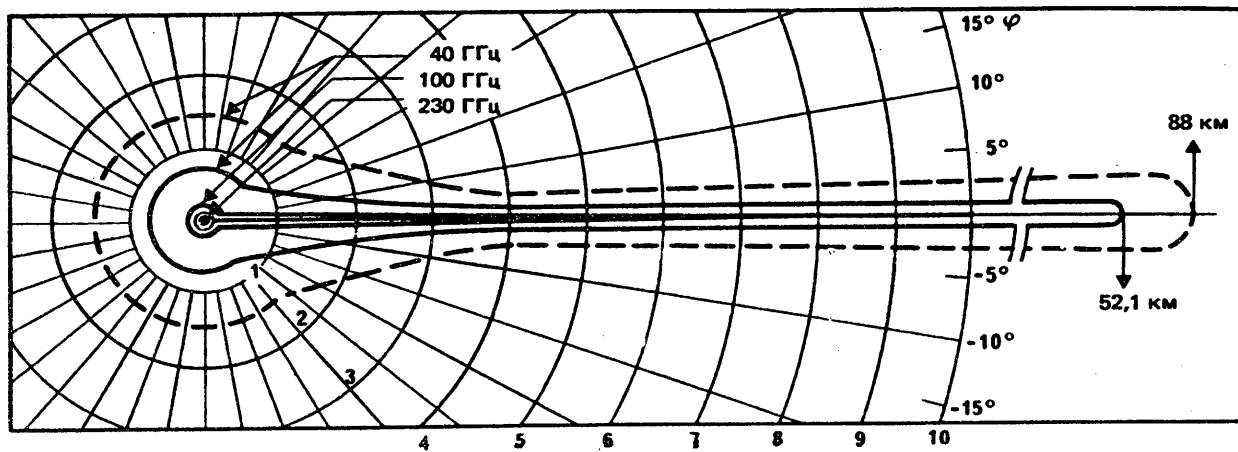


РИСУНОК 2 — Необходимый разнос для наземной передающей станции

————— угол места антенны земной станции 45°

----- 10° на частоте 40 ГГц

ОТЧЕТ 1142

**СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТ ФИКСИРОВАННОЙ СЛУЖБОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБОЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ СПУТНИКИ
НА СЛЕГКА НАКЛОННЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ОРБИТАХ**

(Исследовательские программы 17Н/9 и 32Н/4)

(1990)

1. Введение

Имеются две стратегии продления срока службы на орбите геостационарных спутников. Они основаны на том, что период нормальной эксплуатации спутника в значительной мере зависит от количества топлива, предназначенного для удержания спутника от дрейфа в направлении север—юг, которое приблизительно в десять раз больше того, которое требуется для удержания от дрейфа в направлении восток—запад.

- (1) Если топливо, предназначенное для удержания спутника на заданной позиции, почти израсходовано, но спутник в других отношениях работает удовлетворительно, то срок его нормальной эксплуатации на орбите мог бы быть существенно продлен, если оставшееся топливо будет использоваться только на удержание спутника по долготе.
- (2) Спутник, предназначенный для работы на геостационарной орбите, в начале эксплуатационного периода выводится на наклонную орбиту с такими параметрами, что если не производится коррекция, то естественное наклонение уменьшается. Орбита становится все менее наклонной и, наконец, будет экваториальной. Наклон далее будет продолжать увеличиваться, если не расходуется топливо на противодействие влиянию Солнца и Луны. Эта стратегия позволяет сохранять спутник на круговой геосинхронной орбите с относительно малым наклоном при меньшем начальном количестве топлива, чем требуется при выводе спутника в начале работы на геостационарную орбиту.

Из-за неблагоприятного влияния на зоны обслуживания спутника, на наведение антенн земных станций и т. п. допуск на степень наклона орбиты для органа управления спутником в большинстве случаев очень ограничен, и при отсутствии какого-либо руководства по этому вопросу в Регламенте радиосвязи МКРЧ в свои правила процедуры включил наибольшее значение наклона, равное 5° . На практике это значение пока не превышалось, но некоторые организации управления спутниками высказали мнение об увеличении наклона вплоть до естественного предела, равного 15° .

Регламентации относительно помех между геостационарными спутниковыми системами, а также между наземными радиорелейными системами и геостационарными спутниковыми системами в настоящее время не охватывают случай, когда орбита значительно отклоняется от истинно геостационарной, но эти виды помех явно зависят от любого наклона.

В результате на собрании ОВРГ в декабре 1987 года МКРЧ просил МККР — об этом же просила МККР и сама конференция ВАКР ОРБ-88 — предпринять дальнейшие исследования в этой области. Данный Отчет направлен на то, чтобы помочь в рассмотрении некоторых вопросов, представляющих интерес, путем представления результатов расчетов влияния наклона орбиты на помехи другим пользователям радиоспектра для спутниковой и наземной служб.

Ряд аспектов этой проблемы, вызывающих озабоченность, нуждается в дальнейшем изучении; к ним относятся:

- а) неопределенность, с какой была построена помеховая обстановка, чтобы разрешить совмещение систем ФСС и ФС. Должны быть рассмотрены ГЭЦ и ГЭЦТ, в частности влияние на них ЦСИС;
- б) была поднята проблема “плеяды” спутников на одной номинальной орбите, но имеющих разные наклоны. Она должна быть рассмотрена в плане ее влияния на совмещение;
- в) координационная зона земной станции — влияние координационных зон больших размеров;
- г) полезное или же какое-либо иное воздействие слегка наклонных орбит на спутниковые службы, отличные от ФСС (например, ПСС, научные программы и т. д.), включая рассмотрение фидерных линий;
- е) влияние существующего Регламента радиосвязи, в частности Статей 11, 13, 14, 27 и 28.

Поэтому предлагается изменить Исследовательские программы 32Н/4 и 17Н/9 и просить администрации провести дальнейшее изучение этой темы.

2. Взаимодействие космическая станция/наземная станция

2.1 Геометрия орбиты

2.1.1 Освещение прежде не освещенных частей Земли

На рис. 1.1 и 1.2 показано увеличение на поверхности Земли зоны, которая имеет прямую видимость со спутника, расположенного на номинальной позиции (0,0), если спутник переходит на наклонную орбиту с наклоном, например, 5 и 15° соответственно. Заштрихованные зоны представляют дополнительное освещение Земли. Хотя большая часть этого нового покрытия попадает в полярные области, “клинья” восток — запад опускаются значительно ниже, достигая собственно низких широт.

Некоторые приемники наземных радиорелейных линий, которые ранее были экранированы от ГСО (или ее части) кривизной Земли, потенциально получают прямую видимость со спутниками на наклонной орбите.

На рисунках представлен случай только для одного спутника на наклонной орбите. В худшем случае, когда каждый спутник находится на наклонной ГСО, зона, подверженная влиянию (заштрихованная), будет включать гораздо большую часть Земли.

2.2 Орбитальные зоны, воздействующие на места расположения радиорелейных станций

На рис. 1.3 показана развернутая на 360° карта неба, видимого с взятой для примера земной станции в Южной Англии (50° с.ш., 0° в.д.). Эта диаграмма показывает геостационарную орбиту (ГСО), видимую с радиорелейной станции, а также как расширяется при различных углах наклона орбиты полюса, в которой спутники могут быть видны некоторое время в течение каждого 24-часового периода. Затененная дуга, окружающая ГСО, представляет зону, в которую рекомендовано не направлять антенны радиорелейных станций, то есть зону в пределах 2° с каждой стороны ГСО для станций, передающих сигналы в полосе 1—10 ГГц (PP 2502.1).

“Цифры восемь” показывают движение спутников, расположенных на ГСО через каждые 10° , в течение 24-часового периода. Дуги представляют верхний и нижний пределы “восьмерок” для худшего случая, когда все спутники находятся на ГСО, наклоненной на 5° , 10° и 15° соответственно.

Рис. 1.3 четко иллюстрирует случай, когда спутники, невидимые с наземной станции, теперь становятся видимы над горизонтом.

На рисунке также показано, как увеличивается зона прямого направления радиорелейной станции на спутник и наоборот. Размер этой зоны прямо зависит от расположения земной станции. Рис. 1.4 иллюстрирует это и показывает изменение зоны в зависимости от широты.

2.3 Помеха наземным станциям от космической станции

2.3.1 Введение

Оценка совместимости систем ФСС и ФС, когда спутники движутся по слегка наклонной орбите, является сложной проблемой. Проводя оценку, необходимо учитывать то, что из-за наклона орбиты дополнительно могут оказаться прямо направленными на спутники в течение периодов времени, зависящих от величины наклона и ориентации лучей радиорелейных станций, и другие наземные станции. Нужно учитывать также, что из-за наклона орбиты части наземной сети, которые могли бы находиться под воздействием больших помех от спутников на ГСО, будут подобным же образом освобождены от помех в течение некоторых периодов времени. Однако даже если длительность противостояния может быть гораздо меньше той, которая наблюдается при отсутствии наклона орбиты, для цифровых систем время противостояния может быть значительным.

В этом разделе представлены результаты различных исследований, в которых анализируются неготовность систем, время воздействия помех, суммарные помехи в гипотетической эталонной цепи и помехи от наземных передатчиков приемным космическим станциям.

2.3.2 Модель неготовности системы

Для простоты рассматривается только помеха от главного лепестка диаграммы направленности антенны, а ее влияние рассчитано при использовании прямоугольной диаграммы усиления антенны. Спутник создает помеху данному наземному приемнику, если азимут его пересечения с горизонтом находится в пределах $\pm 0,5^\circ$ от азимута точки прицеливания приемной антенны. Он оказывает помеху указанному приемнику в течение того периода времени, когда находится между горизонтом и на 1° выше горизонта. Значение отношения δ в таблице I служит информацией для оценки этого периода. Для спутника, имеющего такое склонение, вследствие которого он помещается на горизонте при данной разности долготы, δ представляет угол места, получаемый в результате увеличения склонения на 1° . Термин “склонение” употребляется в данном разделе для простоты, обозначая широту подспутниковой точки.

Для облегчения расчетов допускается, что склонения спутника на наклонной орбите распределены равномерно. Это эквивалентно предположению о треугольной, а не синусоидальной форме изменения склонения спутника во времени. При этом предположении уменьшается время противостояния тех подверженных помехе приемников, чьи антенны направлены дальше в сторону от точки, где геостационарная орбита пересекает горизонт, но существенно упрощается статистика при расчете готовности сети.

2.3.2.1 Расчет неготовности

Рассмотрим наземную радиостанцию, работающую на конкретной широте в условиях, когда все спутники движутся по наклонным орбитам с наклоном α_m , равным 10° . Можно определить λ_s — короткий интервал по долготе, с которого потенциально наблюдается помеха при данной широте и данном наклонении. Этот интервал по долготе увеличивается почти линейно с увеличением угла наклона орбиты. Подобным же образом можно определить Z_s — короткий интервал по азимуту, в котором будет наблюдаться помеха. Поскольку Z_s больше λ_s , спутники будут казаться разнесенными по азимуту больше, чем по орбите. Следовательно, каждый спутник на дуге λ_s будет представлять отчетливый источник помех.

При разnose спутников на геостационарной орбите на S градусов число потенциальных источников помех N будет равно:

$$N_s = \frac{\lambda_s}{S} . \quad (1)$$

Поскольку наземные трассы являются двунаправленными и имеются источники помех к востоку и западу от юга, вероятность того, что пролет подвергается помехам P_I , при пренебрежении шириной луча приемных антенн и при предположении, что направления трасс наземной сети равномерно распределены по углу, равна:

$$P_I = \frac{N_s}{90} = \frac{\lambda_s}{90_s} . \quad (2)$$

Для трассы с приемной антенной, направленной по азимуту в пределах $0,5^\circ$ от азимута, в котором спутник пересекает горизонт, можно определить долю времени, в течение которой трасса подвергается помехам. Так как спутник проходит через каждое склонение дважды в день, он проводит $12/\alpha_m$ часов в день в каждом интервале склонения, равном 1° . Поскольку увеличение угла места на каждый градус увеличения склонения δ обычно меньше единицы и больше зависит от широты, чем от разности долготы спутника, можно использовать среднее представительное значение δ для широты трассы. Тогда время, которое спутник проводит между горизонтом и углом места 1° над горизонтом, равно $12 (\delta\alpha_m)$, а доля времени f_I , когда трасса подвержена помехам, равна:

$$f_I = \frac{1}{2\delta\alpha_m} . \quad (3)$$

Чтобы оценить влияние помехи, приходящей под малыми углами места, предположим, что спутники облучают наземные приемники с максимальной допустимой плотностью потока мощности, равной -152 дБВт в каждой полосе шириной 4 кГц на квадратный метр. Для наземной цифровой радиостанции с шумовой шириной полосы 15 МГц и приемной апертурой площадью 10 квадратных метров и эффективностью 80% мощность принимаемой помехи могла бы быть равной -77 дБм ($-152+30+36+9$).

В настоящее время большая часть мешающих сигналов спутников действует при более низких уровнях мощности. В качестве распространенного примера возьмем единичный видеосигнал с дисперсией, с шириной полосы 3 МГц, который создает мощность принимаемой помехи —84 дБм. Из-за теплового шума и шума приемника, соответствующего коэффициенту шума 3 дБ, мощность шума в системе на входе приемника равна —99 дБм. Следовательно, помеха уменьшит запас на замирание сигнала над уровнем теплового шума приемника на 15 дБ.

Типичная цифровая радиостанция в полосе шириной 4 ГГц имеет запас на замирание сигнала над уровнем теплового шума от 40 до 44 дБ. Взяв среднее значение 42 дБ, получим, что помеха уменьшит этот запас до 27 дБ. Если в цифровой радиостанции применяется автоматическое регулирование мощности передачи (АРМ) и станция работает при номинальном уровне мощности на 12 дБ меньше максимума, эффективное значение запаса приемника на замирание сигнала будет 15 дБ. Замирания сигнала такой величины на наземной трассе имеют тенденцию изменяться медленно и не рассеиваться. Можно ожидать, что замирания сигналов такой глубины на трассе будут наблюдаться в течение от 0,2 до 2,0% времени. Для целей данного расчета как представительное значение процента времени, когда трасса находится в состоянии неготовности в присутствии помехи, будет взято значение 0,5%. Следовательно, вероятность P_u того, что пролет, подверженный помехе, находится в состоянии неготовности, можно получить из выражения (3):

$$P_u = \frac{5 \times 10^{-3}}{2\delta\alpha_m} \quad (4)$$

Нормы неготовности определены в Рекомендации 557 для гипотетического эталонного цифрового тракта (ГЭЦТ), который, как правило, состоит из 50 индивидуальных трасс. Поскольку источники помех для различных пролетов, образующих цепь, различны, они независимы, как и дополнительно возникающие замирания, необходимые для появления состояния неготовности. Таким образом, неготовность сети или цепи из-за помех P_{nu} равна:

$$P_{nu} = 50 P_I P_u, \quad (5)$$

или, исходя из выражений (3) и (5):

$$P_{nu} = \frac{\lambda_S 10^{-2}}{7,2 S \delta\alpha_m} \quad (6)$$

В таблице I приведены значения соответствующих параметров и вероятностей для случая, когда все спутники имеют наклонение 10° . Заметим, что неготовность сети превышает норму, описанную в Рекомендации 615 для всех источников помех, более чем на порядок величины.

ТАБЛИЦА I — Помехи наземным линиям от геостационарных спутников на орбитах с наклоном 10° при орбитальном разnose спутников 3°

	λ_s	Z_s	δ	$100P_I$	$100P_u$	$100P_{nu}$
Широта приемника, испытывающего помеху, градусы с.ш.	Интервал видимости по долготе, градусы	Интервал видимости по азимуту, градусы	Градусы угла места на каждый градус склонения	Процент пролетов, где приемники испытывают помехи	Процент времени, когда пролет, испытывающий помехи, в состоянии неготовности	Процент времени, когда 50 пролетов цепи в состоянии неготовности
20	7,5	22	0,35	2,8	0,071	0,10
30	12	23,5	0,51	4,4	0,049	0,11
40	17,5	27	0,65	6,5	0,038	0,12
50	25	32,5	0,78	9,3	0,032	0,15
60	37,5	43	0,88	13,9	0,028	0,20

Может показаться, что большое значение неготовности цепи является следствием предполагаемого большого значения наклона орбиты, но на самом деле оно почти не зависит от наклона орбиты. Интервал по долготе линейно зависит от диапазона склонений. Таким образом, неготовность сети не зависит от α_m . Уменьшение максимального наклона орбиты (α_m) сокращает число пролетов, испытывающих помехи (P_I), увеличивая долю времени неготовности любого пролета, испытывающего помехи (P_u). Также уменьшение орбитального разноса спутников увеличивает как P_I , так и P_u . Поскольку при расчете P_I ширина луча приемной антенны не учитывалась, рассчитанная неготовность цепи представляет дополнительный вклад от орбит, которым позволили приобрести значительные углы наклона. Не все спутники на орбите обязательно излучают предельное значение плотности потока мощности — 152 дБВт. Они также не занимают равномерно всю полосу частот.

2.3.2.2 Влияние малых наклонов орбиты

Для оценки влияния углов наклона орбиты настолько малых, что интервал видимости по азимуту Z_s сравним с шириной луча антенны, требуется более детальный анализ. При отсутствии орбитальных наклонов доля наземных приемников, получающих помехи в основном луче, зависит от кажущегося угла ε , под которым геостационарная орбита пересекает геометрический горизонт наземного наблюдателя. При орбитальном разnose спутников 3° доля приемных антенн n_0 с лепестком прямоугольной формы шириной 1° , которые испытывают помехи на рассматриваемых широтах, в предположении, что антенны равномерно распределены по углу и по расположению вдоль широты, равна:

$$n_0 = \frac{1}{180 S \sin \varepsilon} \quad (7)$$

В таблице II приведены представительные значения n_0 , которые показывают долю наземных приемников, требующих особого внимания для облегчения совместного использования полос частот. Дополнительную долю приемников, подверженных влиянию помех, приходящуюся на каждый градус максимального орбитального наклона, можно получить как половину вероятности противостояния каждого пролета, разделенную на максимальное орбитальное наклонение $0,5 P_I / \alpha_m$, или:

$$n_{\alpha_m} = \frac{\lambda_s}{180 S \alpha_m} \quad (8)$$

В таблице II показано, что тяжесть совмещения почти удваивается на широтах выше 20° при орбитальных наклонениях менее 1° . Заметим, что цифры в обеих колонках обратно пропорциональны орбитальному разнесу спутников.

ТАБЛИЦА II — Процент наземных приемников, подверженных помехе в основном луче антенны от космических станций с орбитальным разнесом 3°

	$100p_0$	$100p_{\alpha_m}$
Широта приемника, испытывающего помехи, градусы с.ш.	Процент приемников, подверженных помехе в основном луче антенны от спутников без орбитального наклонения	Дополнительный процент приемников, подверженных помехе, на каждый градус орбитального наклонения
20	0,20	0,14
30	0,21	0,22
40	0,24	0,32
50	0,29	0,46
60	0,37	0,69

Данные таблицы II свидетельствуют, что число наземных приемников, подверженных помехе, возрастает с увеличением наклона орбиты. Это указывает на необходимость ограничения наклона орбит спутников. Чтобы определить, требуется ли для ограничения числа и уровня противостояний наземных приемников до приемлемых значений ввести ограничения на наклон орбиты, необходимы дальнейшие исследования с использованием более полных моделей антенн наземных приемников.

2.3.3 Модель подверженности влиянию помех

Вышеприведенный анализ основан на том принципе, что если луч наземной антенны подвергается помехе от спутника на наклонной орбите в течение коротких периодов, то наземный приемник становится потенциально более уязвимым для наступления состояния неготовности, чем если бы такая подверженность вообще не существовала.

Нужно также рассмотреть ситуацию, когда спутники на наклонной орбите могут выходить из данного луча и уровень помехи уменьшается. Тогда пролет становится менее уязвимым для состояния неготовности.

Чистый результат для любой данной сети зависит от конкретного расположения ее приемников и распределения лучей их антенн. Следовательно, можно определить “фактор подверженности помехам” I , равный отношению вероятности подверженности помехам сети, когда все спутники находятся на наклонных орбитах, к вероятности, когда все спутники находятся на ГСО, с учетом длительности действия помех. Пример того, как рассчитать подверженность помехам, приведен в приложении.

Для определения влияния этого фактора на готовность сетей требуется дальнейшее исследование.

2.3.4 Суммарная помеха в гипотетической эталонной цепи

Приемникам фиксированной службы геостационарные спутники обычно кажутся точечными источниками помех, работающими с присвоенных позиций на орбите. В ходе ранее проведенных исследований с использованием компьютеризованных моделей по методу Монте-Карло [May и Pagones, 1971; Cheilik, 1983] были рассчитаны уровни помех, которые могли бы испытывать приемники ФС от космических станций ФСС, расположенных на фиксированных позициях при различных предполагаемых параметрах.

Для того чтобы изучить суммарное влияние этой различной изменяющейся во времени геометрии на станции ФС, была реализована модель Чейлика [Cheilik, 1983] с принятием параметров радиорелейной системы, показанных в приложении I Отчета 387-5, включая предположение, что спутники занимают всю орбиту с разнесом друг от друга на 3° и что каждый из них излучает поток мощности с допустимым значением плотности под всеми углами прихода. Кроме того, модель была модифицирована, и ей была придана способность моделировать размещение каждого спутника на отдельной случайно выбранной наклонной геосинхронной орбите с углом наклона от 0 до 15° .

Модифицированную модель Чейлика использовали как инструмент исследования, и были выполнены прогоны расчетов, с тем чтобы определить средние уровни помех станциям ФС, расположенным на различных широтах и на разных направлениях трассы, когда космические станции ФСС занимают определенный диапазон углов наклона орбиты. Исследование показало, что на любой широте суммарная помеха системе ФС от ФСС при геометрии геосинхронных орбит со случайным наклоном лишь незначительно отличается от помехи, создаваемой спутниками, находящимися на геосинхронной орбите. Прилагаемые графики суммируют результаты одного прогона, выполненного во время исследований. Они оба сравнивают распределения вероятности помехи системе ФС от спутников на орбитах с наклоном 0 и 15° для трасс радиорелейных линий с центром на широте 40° . В одном случае (рис. 2.1) направление трассы было выбрано для получения максимальной помехи (около 77°). Видно, что в этом конкретном случае среднее значение помехи системе ФС меньше при угле наклона орбиты 15° .

Другие прогоны (см. рис. 2.2) показывают противоположный эффект при выборе различных направлений трассы. В результате изучения сделан вывод, что на любой широте средняя помеха системе ФС для всех направлений трассы не зависит от наклона орбиты спутников, но что на конкретных трассах могут быть периодические заметные изменения уровня помехи, когда спутники перемещаются относительно диаграмм направленности антенны станции ФС. Нужно предупредить, однако, что эти исследования касаются только относительной величины помехи от ФСС из-за наклона орбиты и что они не дают объяснений в отношении всех станций ФС, которые могут быть затронуты вследствие наклона орбиты.

2.4 Помехи от наземных станций космическим станциям

2.4.1 Введение

Анализ риска помех космическим станциям предполагает вероятностную основу, поскольку не имеется конкретных данных о расположении и т. п. радиорелейных станций. Анализ основан на оценке вероятности помехи для случая ГСО, а затем с использованием той же модели производится оценка риска для случаев наклонной орбиты (НО). Для случаев НО было выбрано значение наклона орбиты 5° как представляющее приемлемую для анализа величину. При меньших значениях угла наклона оценка потенциальной помехи будет пропорционально ниже, тогда как при больших значениях оценка будет выше.

2.4.2 Модель

Число радиорелейных станций, основные лучи антенн которых могут пересекать ГСО, ограничено теми станциями, которые имеют конкретные азимуты излучения на определенных широтах. Для каждой позиции спутника на ГСО имеется четыре такие точки, считая как северные, так и южные широты, а также расположения восточнее и западнее положения ГСО.

Сделав допуск на ширину луча антенны радиорелейной станции, на ее угол места, и с учетом влияния рефракции, определяем небольшую полосу по периметру зоны покрытия на Земле, содержащую все станции, лучи антенн которых могли бы пересекать ГСО или НО в какие-то моменты времени. Ширина этой полосы является функцией предполагаемых значений параметров модели. На рис. 2.3 показаны полосы для конкретной позиции спутника на ГСО, в которых должны бы располагаться радиорелейные станции, чтобы лучи их антенн пересекали ГСО или НО спутника.

Предполагаемые здесь значения параметров модели — это угол места антенн радиорелейных станций от -1 до 4° и диапазон индекса радиорефракции от 250 до 400. Этот последний фактор увеличивает на 2° эффективный диапазон видимости орбиты с внешнего края полосы. Предполагается также, что центр луча отстоит от рассматриваемой орбиты на $1,5^\circ$, что учитывает ширину луча с некоторым запасом.

Полосы ограничены широтами $\pm 70^\circ$, чтобы покрыть в основном всю обитаемую сушу. Корректировка зоны для включения зон океана может быть сделана с целью проведения количественных оценок.

Эта модель считается консервативной, и на рис. 2.3 показан результат в случае НО для угла наклона орбиты 5° . Заштрихованная зона обозначает те дополнительные страны или географические зоны, которые могли бы потенциально увеличить помехи от радиорелейных станций спутнику на позиции 0° в.д. с наклоном орбиты 5° .

2.4.3 Случай ГСО

При предполагаемых параметрах ширина полосы в случае ГСО равна примерно 7° . Число станций, расположенных в этой полосе, является функцией ее площади и предполагаемой плотности размещения наземных станций. Площадь нужно рассчитать только для одного квадранта от экватора до широты 70° , так как в силу симметрии такая же площадь будет у всех квадрантов. Пересечение с конкретной точкой на ГСО может произойти из всех четырех квадрантов.

При ширине полосы 7° (775 км) в одном квадранте площадь полосы равна $7\,875\,000\text{ км}^2$.

2.4.4 Случай НО

Ширина полосы на низких широтах не меняется с изменением наклона орбиты, но возрастает с увеличением широты в зависимости от наклона орбиты. При наклоне 5° площадь полосы в одном квадранте равна $13\,230\,000\text{ км}^2$, а ожидаемое число станций будет в 1,68 раза больше, чем в случае ГСО.

Этот результат будет изменяться прямо пропорционально изменению наклона, и его можно принять в качестве представительного для характеристики влияния наклона орбиты.

2.4.5 Количественная оценка

Оценки числа потенциальных пересечений орбиты лучами антенн радиорелейных станций можно получить, предположив максимальную плотность расположения радиорелейных станций на всей площади суши, содержащейся в полосе, достаточно плотно населенной, чтобы оправдать сделанное предположение. Максимальная плотность, равная одной станции на каждые 2500 км^2 , допускает расположение станций через каждые 50 км во всех направлениях. Это соответствует нормальной длине одного интервала, применяемого проектировщиками радиорелейных линий.

Далее предположено, что с учетом плотности населения и влияния зон океана рассматриваемая площадь составит порядка 20% от всей площади. Предполагается случайное направление радиорелейных антенн с шириной луча 2° , и при применении этих предположений к случаю ГСО получается, что общее число станций, лучи антенн которых, возможно, пересекают орбиту, будет около 14, а в случае НО — около 24.

2.4.6 Практические соображения

В модели приняты несколько предположений, которые очень консервативны, а именно:

- значения угла места антенн радиорелейных станций от -1 до 4° ;
- использование единообразной плотности размещения радиорелейных станций;
- единый диапазон в 2° угла места, считающийся представительным;
- стандартное номинальное значение индекса рефракции, равное 300,

и, возможно, целесообразно произвести соответствующие корректировки. Чистый эффект применения этих корректировок — уменьшение рассматриваемой площади до 42% от принятой в первоначальной модели для случая ГСО и до 64% — в случае НО. Число потенциальных противостояний уменьшается приблизительно до 6 для случая ГСО и до 15 — в случае НО.

2.4.7 Реальный опыт

Обзор спутников ИНТЕЛСАТ на ГСО, испытывающих помеху от наземных радиорелейных станций, показал, что их влияние было незначительным. Фактически за последние 10 лет был зарегистрирован только один такой случай.

3. Помехи между земными и наземными станциями

3.1 Введение

Отсутствие или прекращение действия системы удержания позиции геостационарного спутника по широте приведет к непрерывному изменению наклона его орбиты. Земная станция, работающая с таким спутником, может следить за ним с помощью основного луча своей антенны по кажущейся суточной траектории (узкая цифра восемь). Когда такая земная станция координирована со станциями наземных служб для работы со спутником на "строго" геостационарной орбите (движение спутника в пределах предписанных или установленных *малых* допусков отклонения от позиции), необходимость следить за спутником, орбита которого имеет или приобретает значительный наклон, приведет к изменениям (как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения) значений угла места и связанных с ними значений угла азимута основного луча антенны земной станции по сравнению с теми, при которых была проведена координация. Особое беспокойство вызывает случай значений угла места меньших, чем необходимо для работы с геостационарным спутником, так как в результате увеличивается значение усиления антенны земной станции в направлении на горизонт, которое определяет потенциальные помехи наземной станции и от нее.

3.2 Геометрические соображения

3.2.1 Аналитические выражения

Значения угла места (ϵ_S) и азимута (α_S) основного луча антенны земной станции в направлении на космическую станцию, находящуюся на наклонной геостационарной орбите, в точке с максимальным отклонением определяются следующими выражениями:

$$\epsilon_S = \arcsin ((K \cdot A - 1,0)/B), \quad (1)$$

$$\alpha_S = 90,0 + \arcsin (K \cdot \cos(i) \cdot \sin(\delta) / B \cdot \cos(\epsilon_S)), \quad (2)$$

$$A = \cos(i) \cdot \cos(\zeta) \cdot \cos(\delta) + \sin(i) \cdot \sin(\zeta), \quad (3)$$

$$B = (1,0 + K^2 - 2 \cdot K \cdot A)^{0,5}; \quad (4)$$

заметим, что $\arcsin(-x) = 180,0 - \arcsin(x)$,

где

- K : отношение радиуса геостационарной орбиты к радиусу Земли, равное 6,62
- i : наклон орбиты (положительное значение при восходящем узле восточнее Гринвича)
- ζ : широта земной станции (положительное значение — северная)
- δ : разность долготы космической и земной станций.

На рис. 3.1, 3.2 и 3.3 показаны некоторые результаты, полученные по выражениям (1) — (4), выше. На рис. 3.1 и 3.2 представлены изменения минимального угла места антенны земной станции соответственно на широтах 20° и 60° в зависимости от разности долготы земной станции и подспутниковой точки. На рис. 3.3 показаны изменения азимута основного луча антенны из-за изменения наклона орбиты от нуля до 15° , когда разность долготы земной станции и подспутниковой точки равна 30° .

3.2.2 Потеря развязки

Когда спутник начинает движение по наклонной орбите, угол места и азимут луча антенны земной станции изменяются во времени. Это может привести к изменению усиления антенны в направлении на горизонт, что рассматривается в следующих разделах.

Как уменьшение угла места, так и соответствующий сдвиг азимута являются не только функциями наклона орбиты спутника, за которым следит антенна земной станции, но также функциями широты и относительной долготы (разность долготы относительно подспутниковой узловой точки) рассматриваемой земной станции, как показано на рис. 3.4 и 3.5 для двух значений наклона орбиты 5° и 10° , соответственно.

На этих рисунках внешняя окружность описывает те места расположения на поверхности Земли (в градусах широты и долготы относительно подспутниковой узловой точки), где угол места основного луча антенны земной станции в направлении на спутник, находящийся на наклонной орбите, никогда не бывает меньше 3° . Внутренняя мидалевидная зона содержит ту часть поверхности Земли, где угол места никогда не бывает меньше 48° и, таким образом, не подвержен изменениям усиления антенны в направлении на горизонт (в предположении, что за пределами угла 48° вне главной оси усиление антенны значительно не изменяется).

На верхней диаграмме каждого рисунка штриховые линии показывают значения увеличения усиления антенны земной станции в направлении на горизонт (в дБ), основанные на диаграмме направленности в форме $A - 25 \log \theta$ дБ. На нижней диаграмме штриховые линии показывают для соответствующих расположений земных станций сдвиг азимута основного луча антенны земной станции от значения, соответствующего работе со спутником на строго геостационарной орбите, до значения, при котором спутник на наклонной орбите виден под наименьшим углом места. Сдвиг азимута всегда направлен в сторону экватора. На земных станциях на долготе спутникового узла имеет место наибольшее увеличение усиления антенны в направлении на горизонт и наименьший сдвиг азимута; на земных станциях вблизи экватора увеличение усиления антенны в направлении на горизонт наименьшее, а сдвиг азимута наибольший. Чем больше наклон орбиты, тем больше как увеличение усиления антенны в направлении на горизонт, так и сдвиг азимута.

Нижняя диаграмма на рис. 3.5 показывает в виде дополнительного набора кривых боковой сдвиг "общего объема" на высоте 4 км. Это наибольшее значение высоты, с которой можно ожидать возникновение помехи, вызванное рассеянием радиоволн в дожде.

3.3 · Влияние на координационную зону земной станции

Вследствие изменений азимута и угла места основного луча антенны земные станции, которые прежде были координированы с наземными системами на основе работы со спутником на ГСО, могут подвергнуться помехам при использовании наклонной орбиты. Кроме того, дополнительно могут подвергнуться помехам и другие наземные станции. Новые координационные контуры будут тогда функцией расположения(й) ГСО и дуги, для которой они были рассчитаны. Поскольку в мире работает множество земных станций, возникнут самые разнообразные ситуации.

Здесь рассматривается комплекс граничных условий, что может помочь в оценке потенциальной проблемы рекоординации земных станций, где это оказывается необходимым.

3.3.1 Земные станции с малыми углами места их антенн

Работать со спутниками на наклонных орбитах при значении наклона 5° могут только те земные станции, у которых значения угла места антенн равны от 5° до 10° при номинальном расположении ГСО в зависимости от широты земной станции. Координационный контур наибольших размеров будет основан на значении усиления антенны в горизонтальной плоскости, равном от 7 до 14,5 дБ. Что касается принимающей станции, это значение усиления устанавливает чувствительность к помехе. Для передающей станции это определяет плотность э.и.и.м. в горизонтальной плоскости.

3.3.1.1 Максимальное изменение азимута

Для земной станции на экваторе, работающей со спутником на наклонной орбите, изменение азимута при движении антенны равно приблизительно удвоенному значению угла наклона орбиты, тогда как изменение угла места очень мало. В азимутальных направлениях между $\pm 50^\circ$ усиление антенны земной станции в горизонтальной плоскости увеличится при повороте антенны на север и юг во время сопровождения спутника. Радиорелейные станции воспримут увеличение плотности э.и.и.м. земной станции, тогда как приемник земной станции воспримет наземные сигналы более высокого уровня.

Для земной станции, работающей при номинальном значении угла места антенны 5° , увеличение диапазона азимутов в $\pm 50^\circ$ для случая наклона орбиты на 5° составит от 0 до 4,9 дБ. Влияние на координационную зону земной станции, которая была координирована при угле места антенны 5° на частоте 6 ГГц, использующей максимальную допустимую плотность э.и.и.м. 40 дБВт/4 кГц, заключается в расширении контура вокруг области основного луча при отсутствии изменения номинального азимута.

3.3.1.2 Максимальное изменение угла места

Для земных станций на высоких широтах изменения азимута основного луча антенны очень малы, тогда как диапазон угла места приблизительно равен удвоенному значению угла наклона орбиты. Работать со спутником на наклонной орбите поэтому будут только земные станции при номинальном значении угла места 10° на ГСО. Это могло бы означать снижение угла места до 5° в течение части времени слежения за спутником и увеличение на 7,5 дБ усиления антенны при этом азимуте, что в результате приводит к увеличению координационной зоны главным образом вдоль азимута основного луча.

3.3.1.3 Между двумя крайними случаями

Имеются такие места расположения земных станций, где азимут и угол места антенны изменяются примерно на одну и ту же величину, но меньше, чем в каждом из приведенных выше случаев. Здесь изменение усиления антенны меньше, чем в крайних случаях, а координационная зона во всех случаях изменяется главным образом в районе основного луча антенны земной станции. На рис. 3.6 представлен такой случай.

3.3.2 Земные станции при больших углах места их антенн

В этом случае влияние на координационный контур будет вызвано главным образом изменениями угла места антенны.

При номинальных значениях угла места в диапазоне от 15° до 20° изменение усиления антенны будет иметь максимальное значение около 4,4 дБ. При значении угла места больше 20° изменение его на 5° относительно номинального значения вызовет максимальное увеличение усиления антенны в горизонтальной плоскости на 3 дБ. При номинальном значении угла места больше, чем приблизительно 53° , усиление антенны не будет изменяться.

Полученные в результате координационные расстояния можно оценить, исследовав самые разные случаи. Рассмотрим три типа земных станций, работающих в дождевой климатической зоне Z и при распространении радиоволн по дуге большого круга (мода 1) в Зоне А. Используя Приложение 28 Регламента радиосвязи, найдем, что если эти земные станции расположены и работают при разности долготы 30° относительно подспутниковой точки, увеличение координационного расстояния в направлении усиления основного луча антенны составит приблизительно 3,4%, 4,3%, 4,9% и 8,6% на широтах 30° , 40° , 50° и 60° соответственно при наклоне орбиты на 5° и 13,0%, 15,6%, 21,3% и 47,6% при наклоне орбиты на 15° .

Соответствующие изменения азимутов антенн земных станций на широтах 30° , 40° , 50° и 60° будут на $4,61^\circ$, $3,21^\circ$, $2,11^\circ$ и $1,48^\circ$ при наклоне орбиты на 5° . При наклоне орбиты на 15° усиление основного луча антенны изменяется на $12,17^\circ$, $8,66^\circ$, $6,11^\circ$ и $4,2^\circ$. Для земных станций с типичной шириной основного луча на уровне половинной мощности меньше 1° последние значения изменений направления основного луча представляют значительное увеличение требований координации.

3.4 Помехи приемникам ФС от земных станций

Одна администрация провела стохастическое исследование увеличения помех наземным станциям при работе земных станций со спутниками на наклонных орбитах, в котором земные станции используются на широте 41° к северу и в силу ограничений расположены так, что угол места их антенн в направлении наклонной орбиты максимален для данного места расположения. Сообщаются результаты исследования для углов наклона орбиты 5, 10 и 15° . При угле наклона 15° помеха увеличивается на 4,5 дБ у 23% наземных приемников в течение по крайней мере 10% времени (2,4 часа в день), тогда как при угле наклона орбиты 5° у 38% наземных приемников помеха возрастет на 1,5 дБ в течение 10% времени. Ожидаемое увеличение помехи будет меньше при больших значениях угла места или при азимутах антенн наземных приемников, направленных в сторону вне геостационарной орбиты, нежели при равномерном распределении, как было принято здесь. Однако на более высоких широтах при меньших значениях углов места ожидаемые помехи будут больше.

3.5 Резюме

Страны, расположенные вблизи экватора, обычно не будут требовать рекоординации своих земных станций, когда они работают со спутниками на наклонных орбитах. Даже когда значения их относительной долготы не попадают в миндалевидную зону, где угол места превышает 48° , произойдет лишь небольшое увеличение усиления антенны земной станции в направлении на горизонт, которым можно пренебречь.

Страны, расположенные на более высоких широтах, подвергаются гораздо более сильному воздействию помех и могут в некоторых случаях испытывать трудности при координации и особенно при рекоординации своих земных станций для работы со спутником на орбите с большим наклоном. Однако во всех случаях возможен компромисс между согласием на увеличение трудностей при координации земных станций и более интенсивной работой со спутником на наклонной орбите.

4. Заключение

В настоящем Отчете исследована ситуация при совместном использовании частот системами фиксированной и фиксированной спутниковой служб, когда спутники движутся по наклонной орбите. Наземные сети испытывают воздействие как со стороны космических, так и земных станций. Точно так же на спутниковые сети будут оказывать влияние помехи космическим и земным станциям.

Ситуация при совместном использовании частот, когда спутники движутся по слегка наклонной орбите, сложная. В течение коротких периодов времени приемники фиксированной службы подвергаются непосредственным помехам от спутников, и наоборот. Число наземных станций, подвергающихся таким помехам, возрастает с увеличением наклона орбиты.

В этом разделе было исследовано влияние таких помех на неготовность системы, а также на принимаемую суммарную помеху. Была разработана модель, которая показывает, что при предположениях, принятых в ней, можно было бы ожидать возрастание неготовности на порядок величины. Эти предположения включают: систему с адаптивным регулированием мощности, размещение всех спутников на орбите с углом наклона 10° и излучение ими потока энергии с ППМ — 124 дБВт/м^2 , разнос их друг от друга на 3° . Однако отмечено, что с учетом тенденции применения на земных станциях малых антенн сомнительно, чтобы организация, управляющая спутником, использовала большие углы наклона. Другие модели, основанные на оценке распределения лучей от реальной радиорелейной сети, показывают, что суммарная из конца в конец помеха может быть в некоторых случаях уменьшена в зависимости от фактора подверженности помехам.

В третьей модели расчеты суммарной помехи в гипотетической эталонной цепи показывают, что помеха не увеличивается, а перераспределяется по длине цепи.

Необходимы дальнейшие исследования моделей, используемых для расчета помех. Требуется дополнительная информация о распределении лучей наземных станций вокруг орбиты.

Необходимы также исследования, имеющие целью разработку для обеих служб методов улучшения помеховой ситуации, особенно для малых углов наклона орбиты. Они должны включать такие методы, как автоматическое регулирование мощности, компенсаторы помех, использование широких пределов ППМ, ограничение наведения спутниковой антенны, пределы наклонения, процедуры координации, экранирование рельефом местности и другие.

Что касается влияния на координационную зону между земными и космическими станциями, то оно изменяется с углом места, азимутом антенны и долготой земной станции. Полученное в результате увеличение координационного расстояния изменяется в зависимости от величины наклона. Это должно быть учтено при проведении координации или рекоординации.

Настоящий Отчет отражает предпринимавшееся ранее исследование темы использования наклонной орбиты. Предлагается срочно продолжить ее изучение, поскольку такое использование наклонной орбиты может возрасти благодаря его преимуществам в продлении срока службы спутника.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ФАКТОР ПОДВЕРЖЕННОСТИ ПОМЕХАМ

Фактор подверженности помехам — это отношение вероятностей подверженности помехам лучей антенны наземной станции, когда спутники находятся на наклонной орбите и когда спутники находятся на ГСО.

На рис. А.1 представлен в качестве образца случай, когда все спутники расположены на ГСО. Лучи наземных антенн распределены около ГСО, как показано. Любой луч, включающий спутник, будет подвержен помехе. Следовательно, зона влияния спутника определяется окружностью с радиусом, равным радиусу сечения луча $\theta_b/2$, вокруг спутника. Это показано на рис. А.2 и именно этот случай представлен в качестве образца.

На рис. А.3 представлен случай, когда спутник движется по наклонной орбите. Показана зона влияния спутника.

Чтобы получить вероятность помехи в случае, представленном в качестве образца, необходимо оценить процент лучей в пределах радиуса $\theta_b/2$ от спутника, если дано статистическое распределение лучей.

Подобным же образом в случае наклонной орбиты процент лучей в выделенной пунктиром зоне, показанной на рис. А.3, нужно оценить, исходя из статистики распределения лучей. Это должно быть далее скорректировано фактором P_d , учитывающим длительность противостояния луча наземной станции спутнику. Он равен числу, показывающему, сколько раз ширина луча укладывается в наклоне луча за 24 часа. Чтобы учесть тот факт, что спутник не обязательно пересекает луч по диаметру, взято среднее расстояние при пересечении луча. Фактор длительности равен:

$$P_d = \frac{\pi \theta_b}{8\alpha}.$$

Фактор подверженности помехам тогда равен:

$$I = \frac{P_I}{P_R} \times P_d,$$

где P_R — процент лучей, подверженных помехе, в случае, представленном в качестве образца (рис. А.2),

P_I — процент лучей, подверженных помехе, при наклонной орбите (рис. А.3),

P_d — фактор длительности.

В таблице I приведены значения фактора подверженности помехам при статистическом распределении лучей в сети, принадлежащей одной администрации. Для более детального ознакомления см. [МККРа].

[МККРа]: 4/355, 9/369 (Канада).

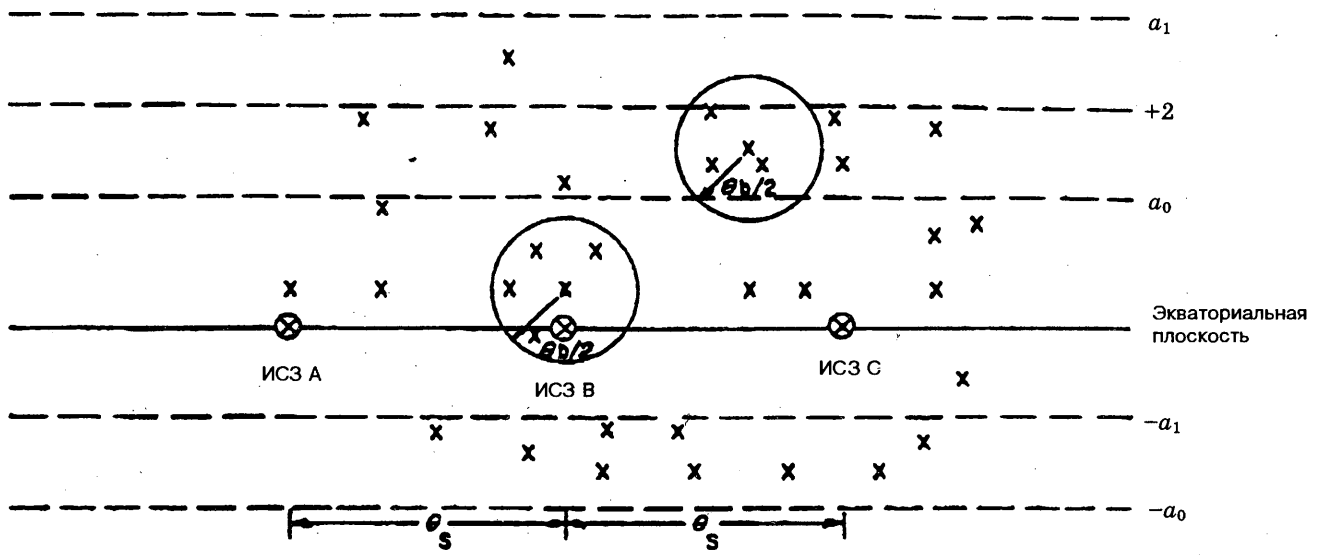


РИСУНОК А.1

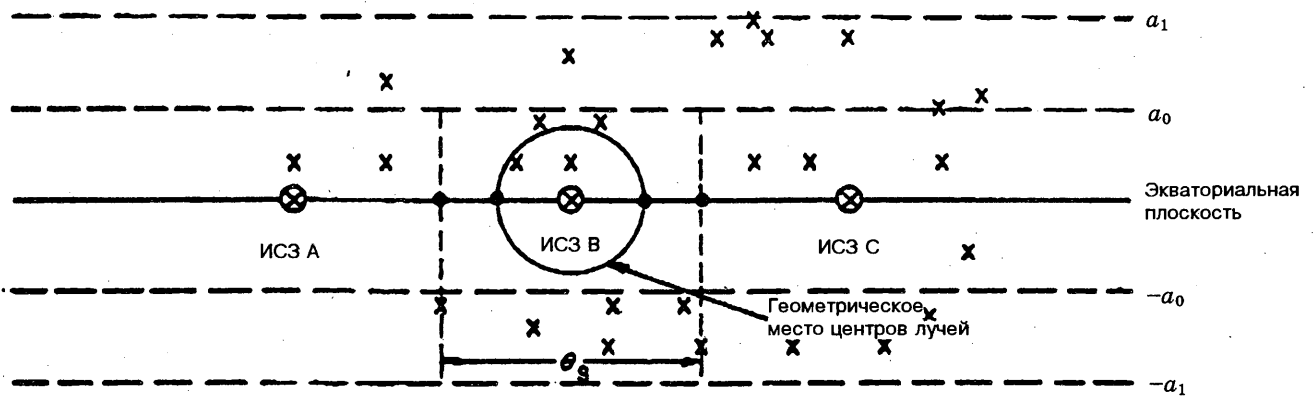


РИСУНОК А.2

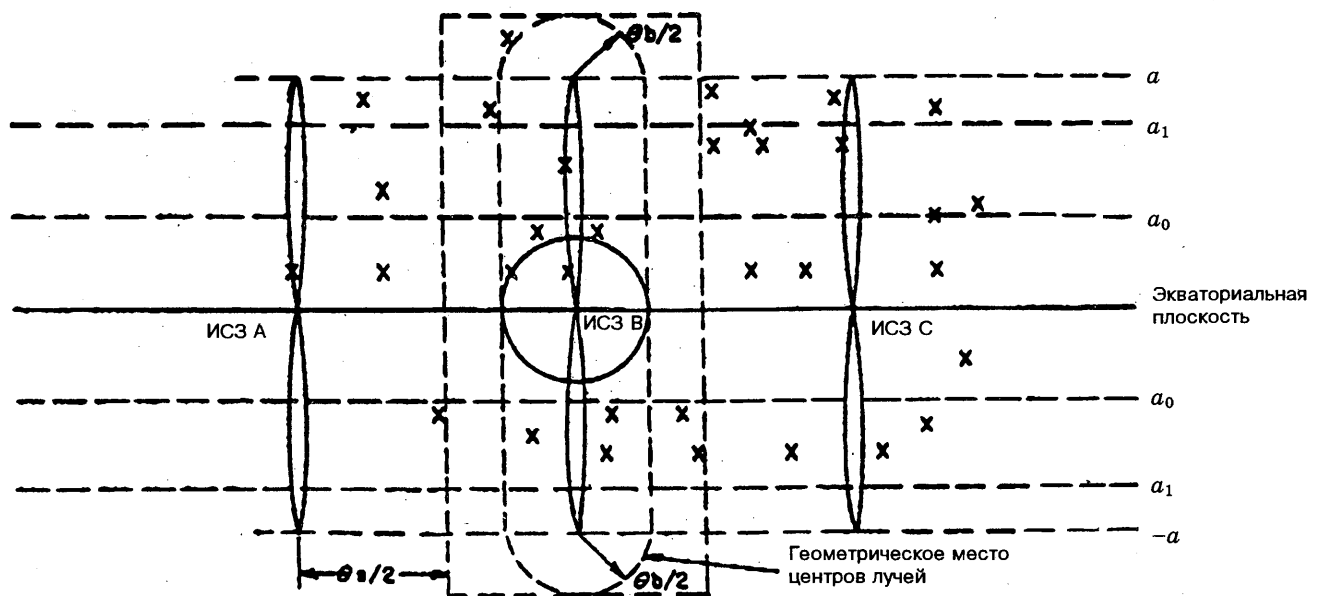


РИСУНОК А.3

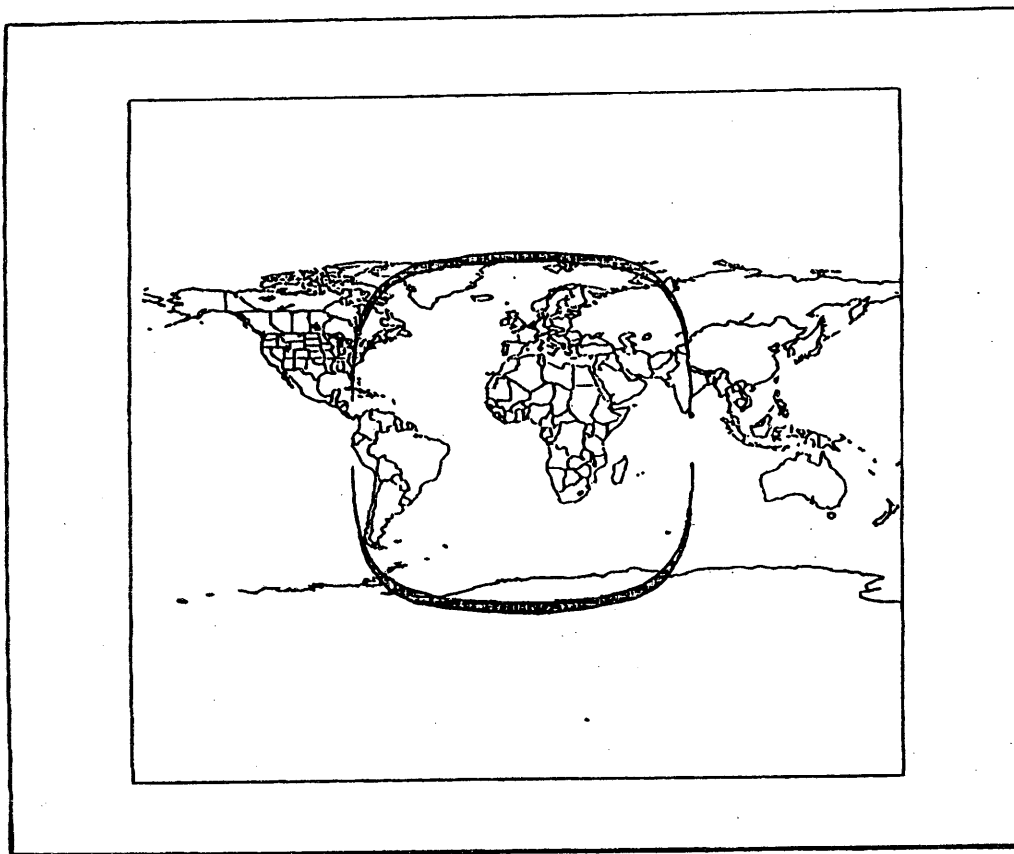


РИСУНОК 1.1 — Увеличение освещаемой зоны на поверхности Земли
(наклон орбиты спутника 5°)

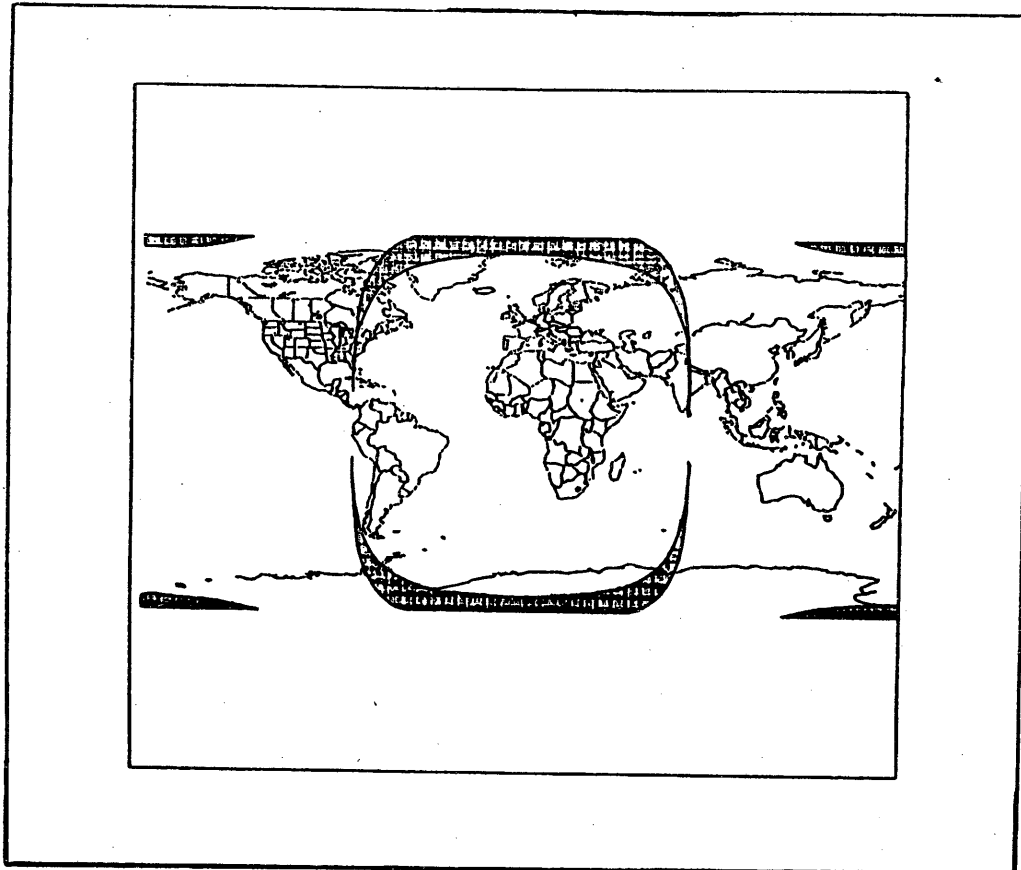


РИСУНОК 1.2 — Увеличение освещаемой зоны на поверхности Земли
(наклон орбиты спутника 15°)

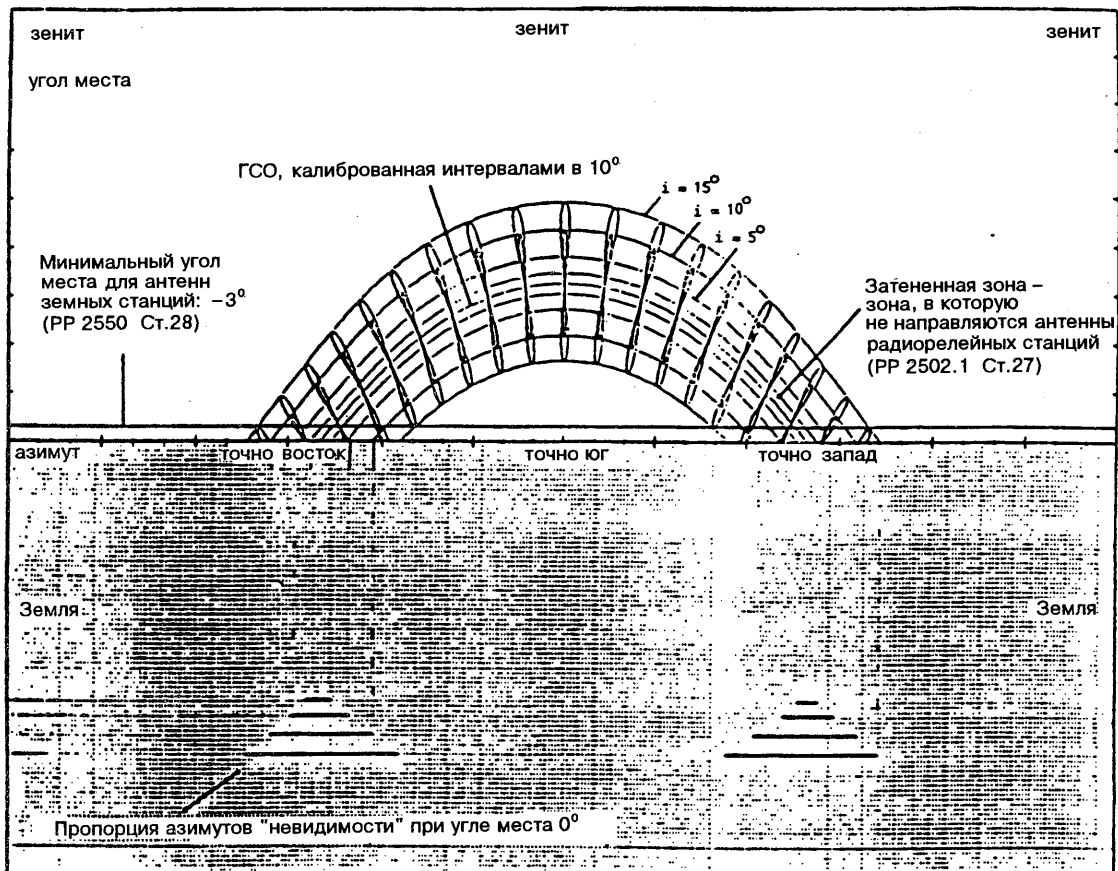


РИСУНОК 1.3 — Общий вид ГСО в орбитальных полосах, возникающих из-за наклона орбиты
(земная станция расположена на 50° с.ш.)

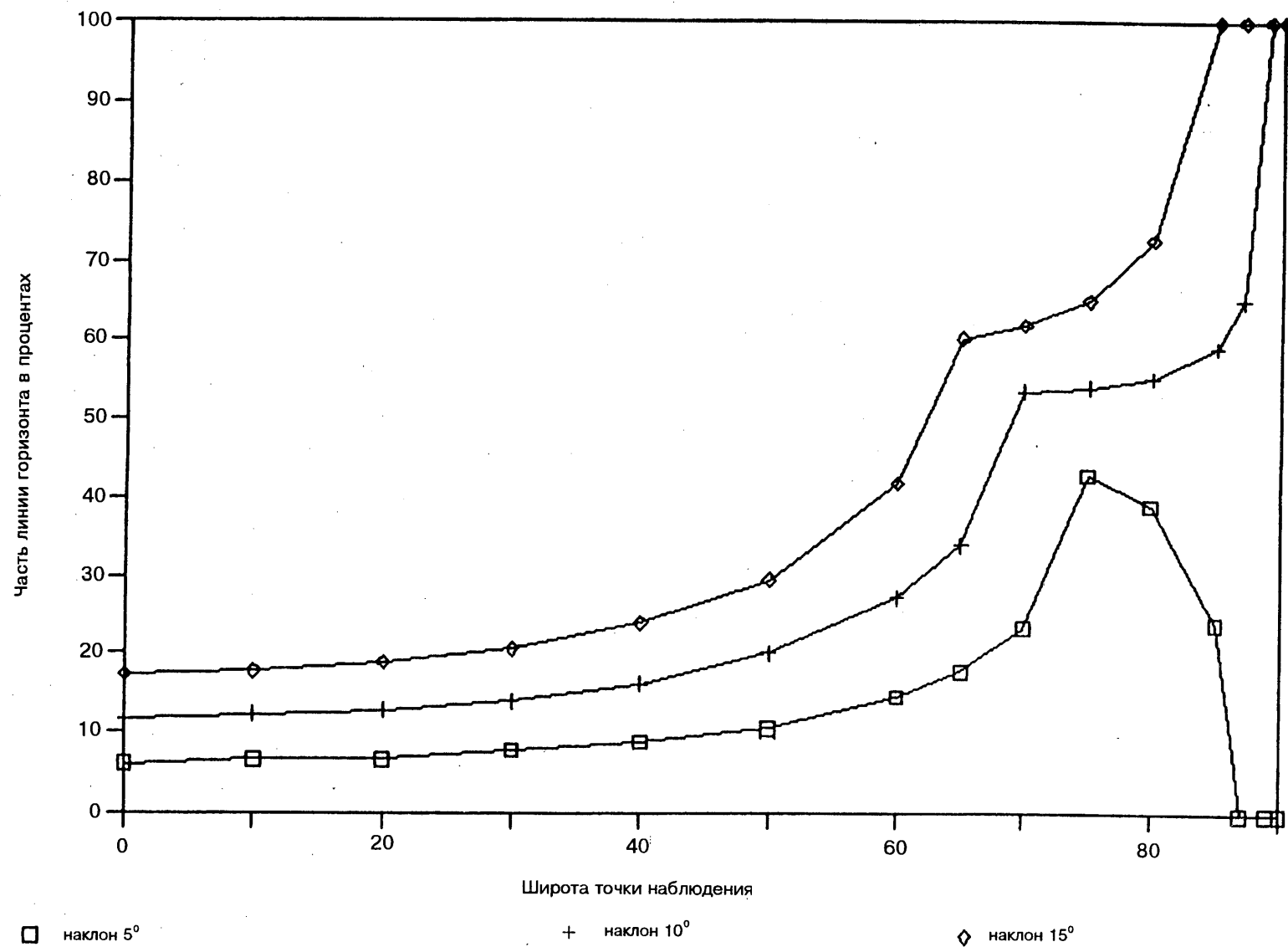


РИСУНОК 1.4 – Часть линии горизонта в процентах, видимая станциями радиорелейных линий, прямо противостоящими спутнику на наклонной орбите

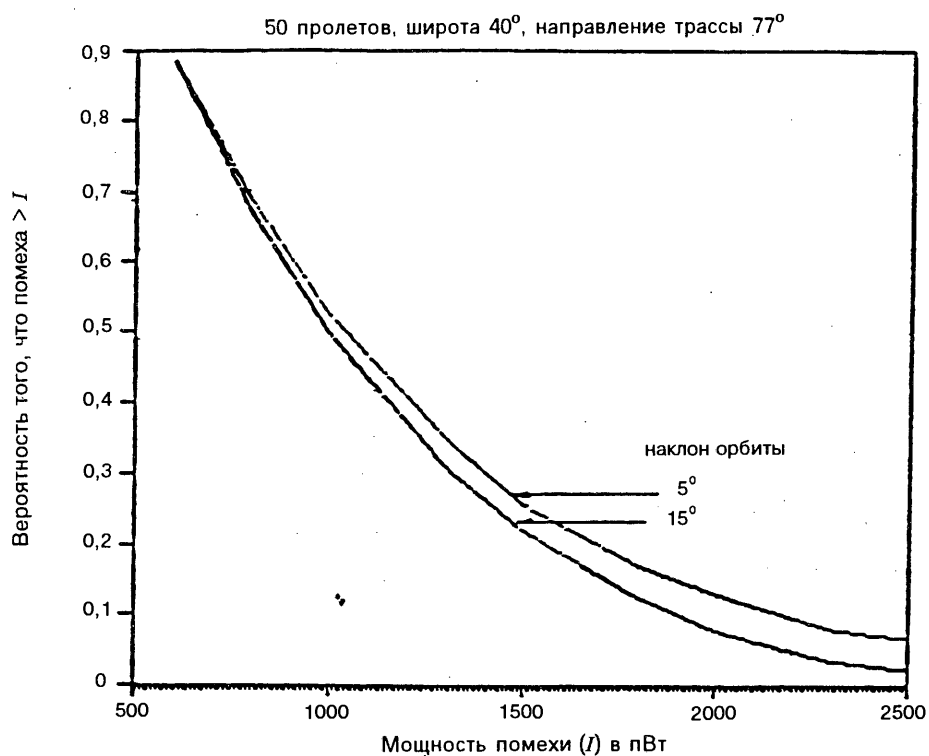


РИСУНОК 2.1 — Распределение помехи

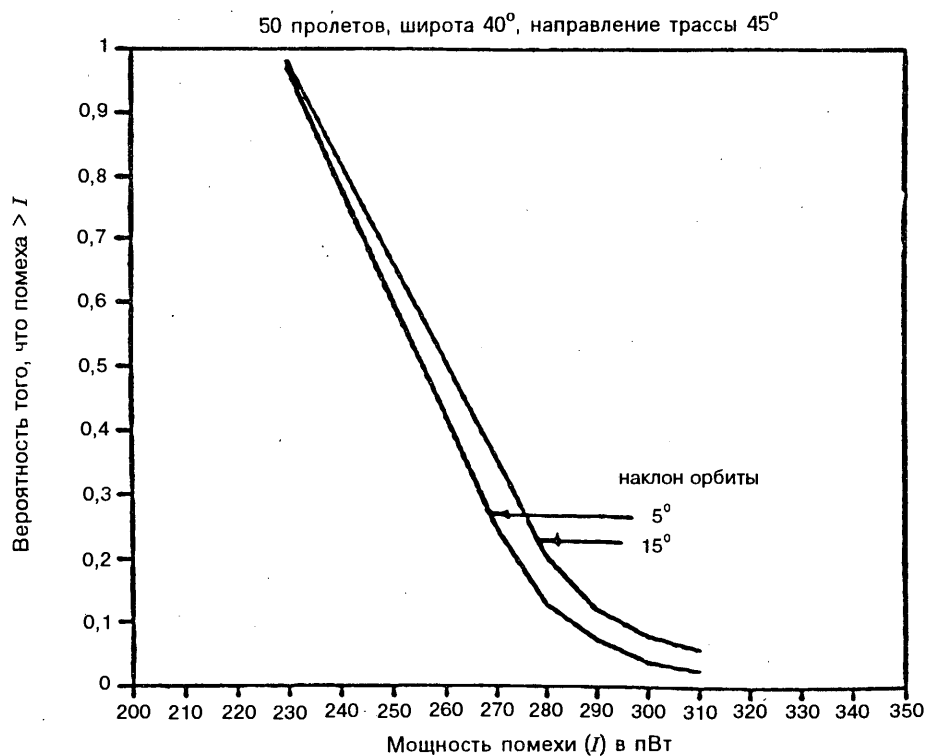


РИСУНОК 2.2 — Распределение помехи

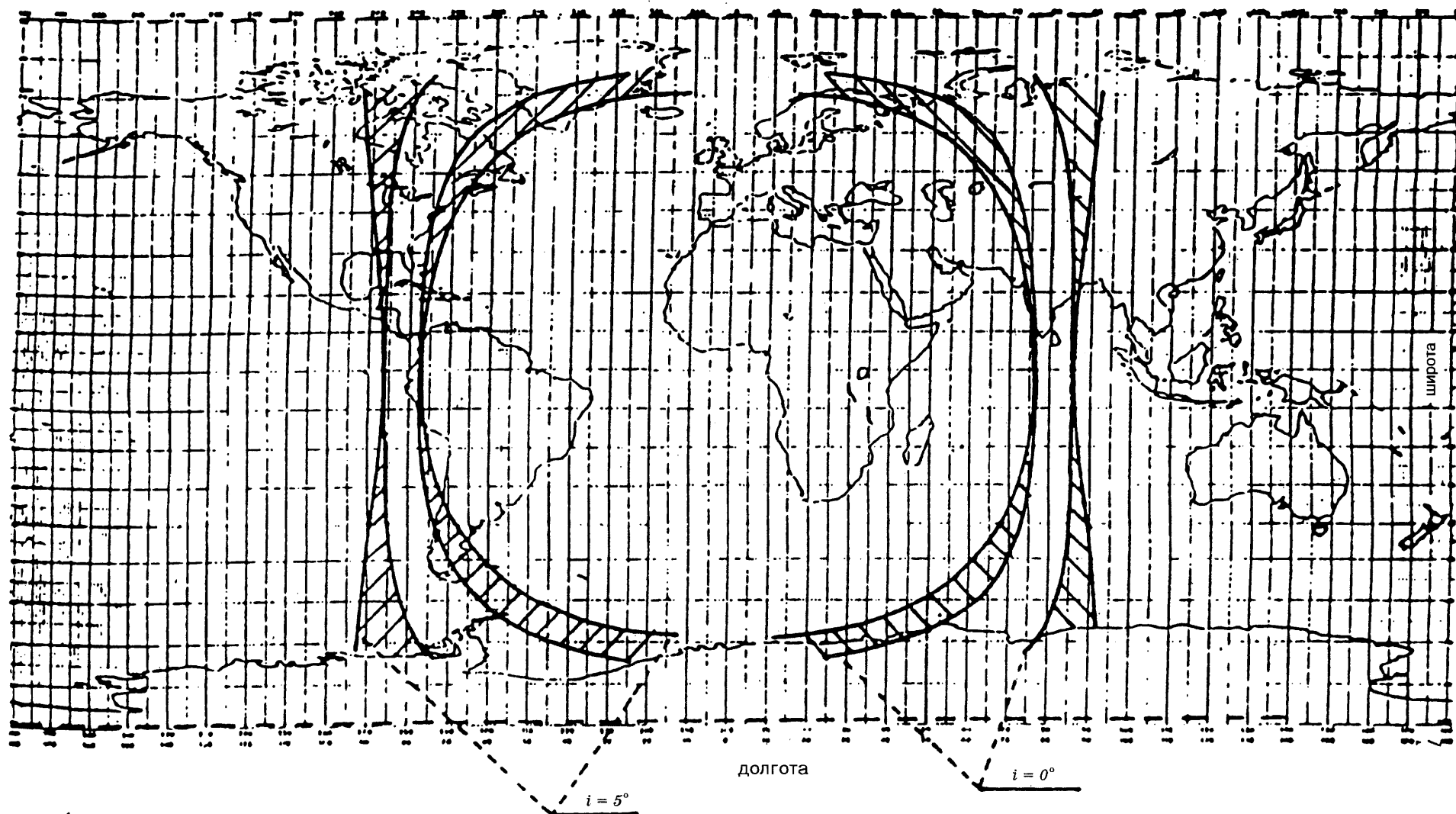


РИСУНОК 2.3 – Области потенциальных помех спутнику на наклонной орбите

Угол места: $-1 - 4^\circ$

Представительный угол: $-2 - 0^\circ$

Угловой разнос: $1,5^\circ$

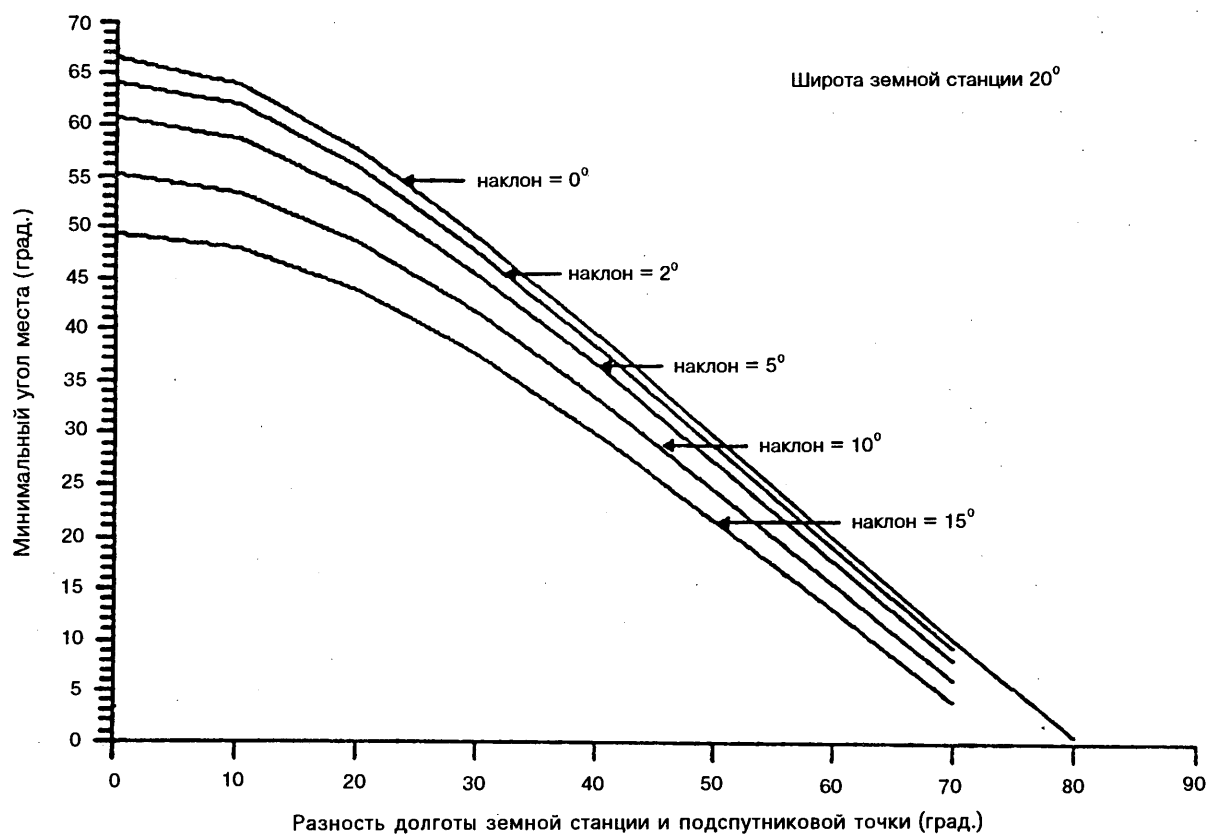


РИСУНОК 3.1 — Зависимость минимального угла места от разности долготы

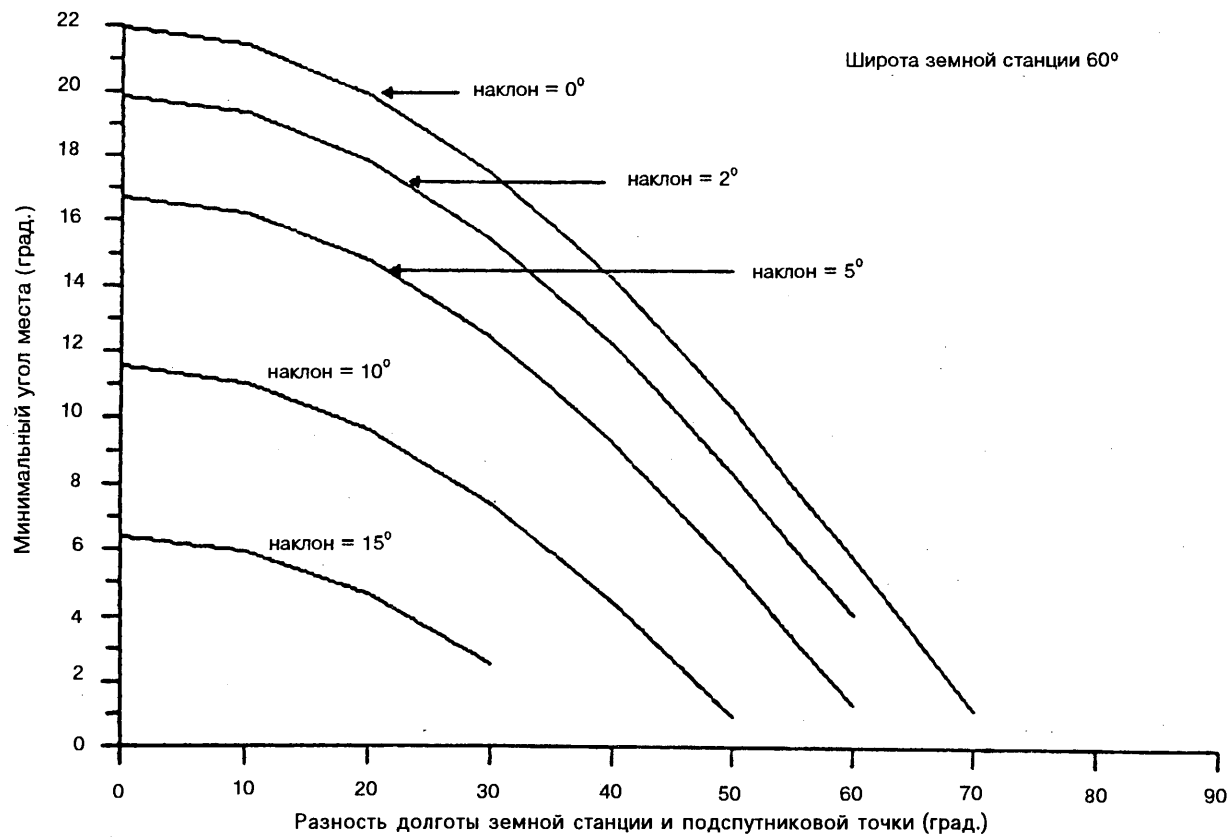


РИСУНОК 3.2 — Зависимость минимального угла места от разности долготы

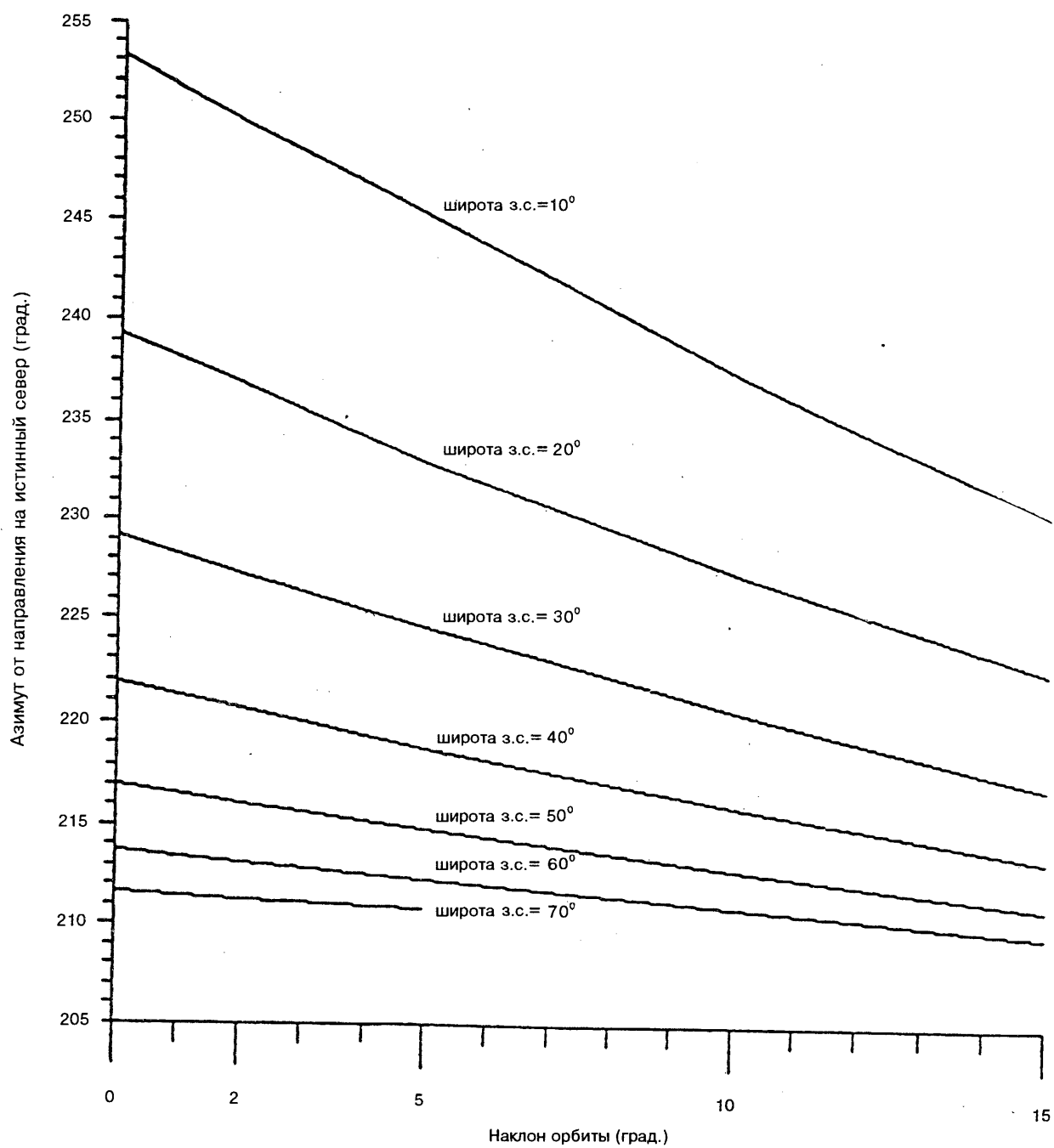


РИСУНОК 3.3 — Изменение азимута основного луча из-за наклона орбиты
(когда разность значений долготы земной станции
и подспутниковой точки равна 30°)

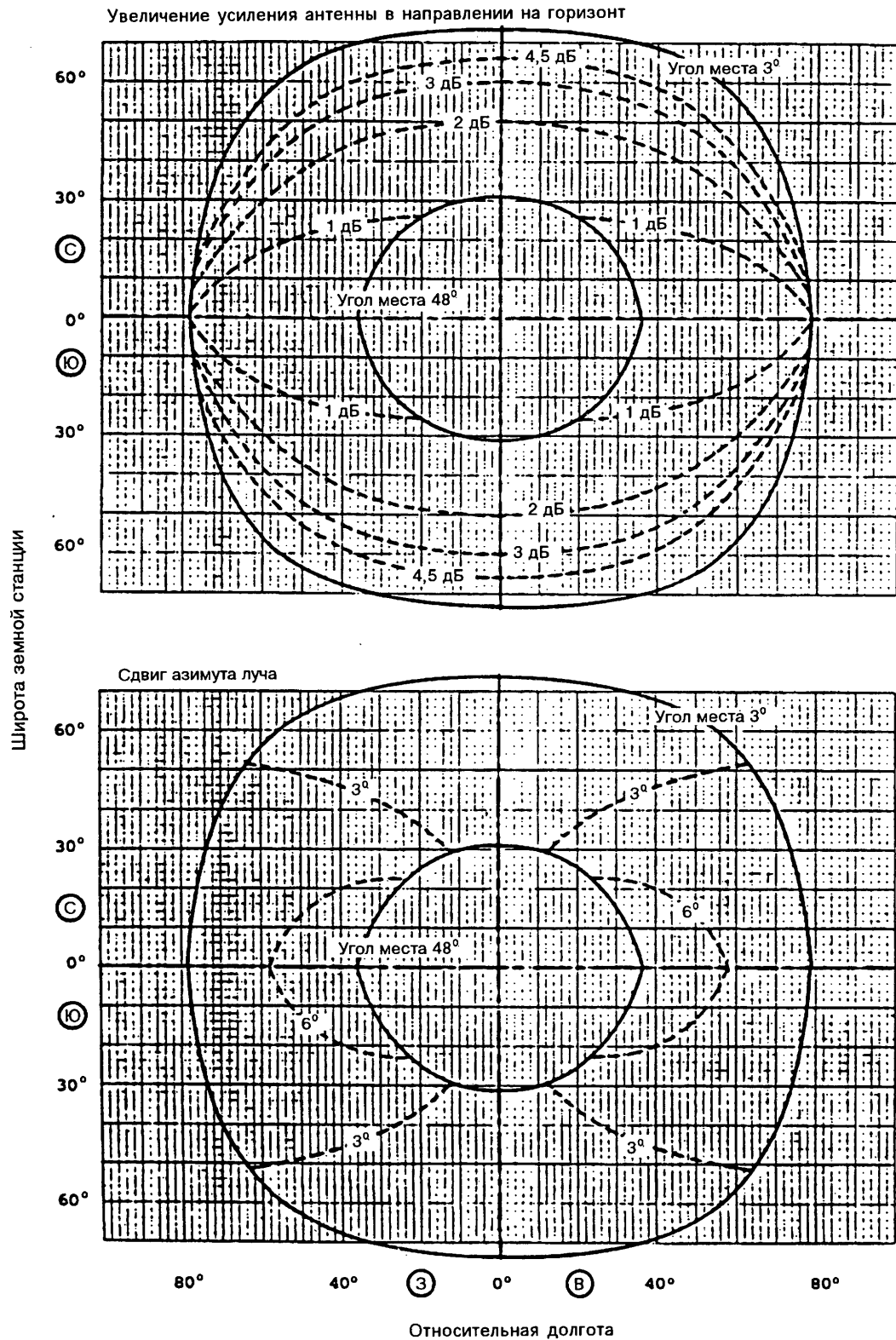


РИСУНОК 3.4 — Увеличение усиления антенны земной станции в направлении на горизонт и сдвиг азимута основного луча. Наклон орбиты 5°

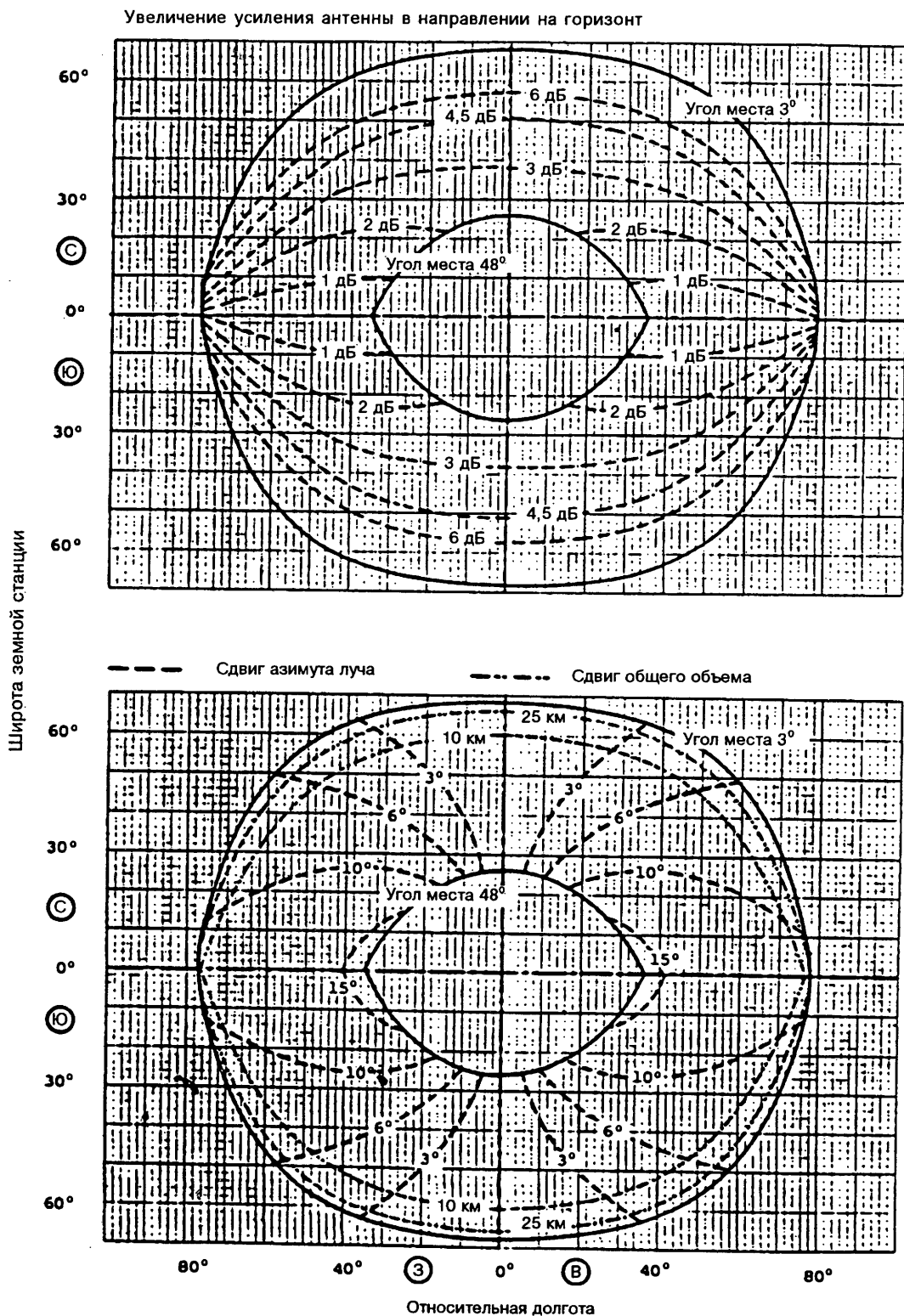


РИСУНОК 3.5 — Увеличение усиления антенны земной станции в направлении на горизонт и сдвиг азимута основного луча. Наклон орбиты 10°

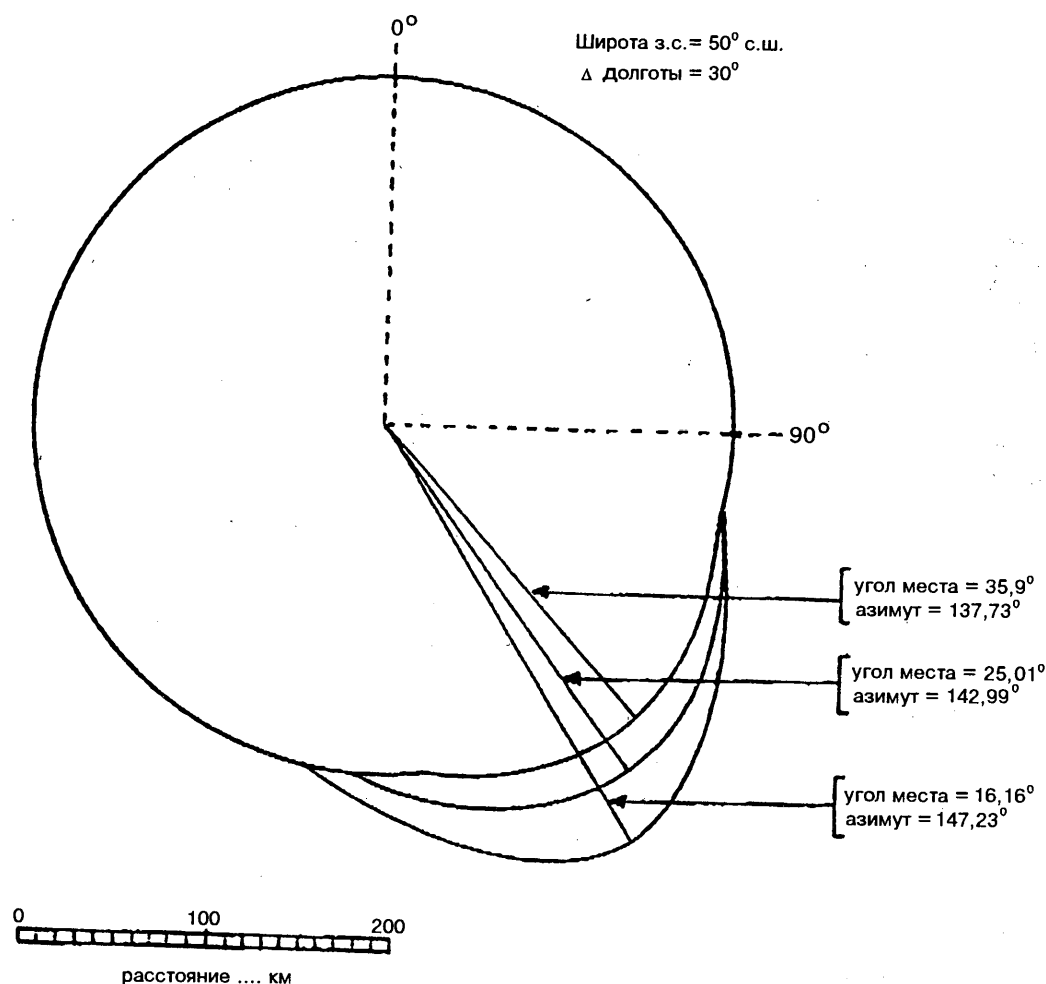


РИСУНОК 3.6 — Координационная зона передающей земной станции (мода 1, Зона А) на частоте 6 ГГц при работе со спутником на орбите, имеющей наклон 10°

ОТЧЕТ 793-1

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОМЕХ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ СОВМЕСТНО С НАЗЕМНЫМИ СИСТЕМАМИ

(Вопросы 32/4 и 17/9)

(1978—1986)

1. Общие положения

В Рекомендации 522 приводятся критерии качества работы цифровых систем передачи фиксированной спутниковой службы. В § 2 раздела "РЕКОМЕНДУЕТ", примечание 4, оговаривается, что эти критерии должны применяться в случае помех от внешних источников.

В связи с тем, что фиксированная спутниковая служба большинство распределенных ей полос частот использует совместно с другими службами, суммарная допустимая помеха включает в себя не только помехи от других спутниковых сетей, но также помехи от наземных систем и должна быть поделена соответственно этим двум классам помех.

В настоящем Отчете обосновываются критерии помех только от наземных систем.

2. Критерии длительной помехи

Долговременные критерии качества цифровых передач в Рекомендации 522 выражаются через требуемый коэффициент ошибок. Следовательно, резонно отнести критерии помех также к коэффициенту ошибок.

Можно было провести параллель с аналоговой телефонной системой передачи ЧРК-ЧМ, в которой оба критерия — качества работы и помех — выражаются через мощность шума в телефонном канале, причем второй критерий составляет малую долю первого. Однако в отличие от аналоговой телефонии ЧРК-ЧМ, коэффициенты ошибок в цифровой системе передачи не складываются линейно, и, чтобы выразить критерий помех через коэффициент ошибок, потребуется сослаться на общий критерий качества, а также на увеличение коэффициента ошибок вследствие помех.

Однако возможны альтернативные методы отнесения критериев помех к общему критерию качества; например, это соотношение может быть определено через параметры на входе демодулятора либо в виде отношения полезного и мешающего сигналов (C/I), либо в виде отношения мощностей шума на входе и на выходе (I/N). Такой метод имеет два преимущества: во-первых, параметры на входе демодулятора определяются легко (и, фактически, должны будут использоваться на промежуточном этапе вычисления при оценке увеличения коэффициента ошибок) и, во-вторых, компоненты помехи (I) сверх первых двух наибольших компонент складываются по мощности почти линейно на входе демодулятора. Это должно облегчить разделение источников помех.

На практике существует довольно сложное соотношение между параметрами на входе демодулятора (C/I) и (I/N), фактором увеличения коэффициента ошибок (k)*, а также рабочими условиями и характеристиками данной цифровой системы. На рис. 1 показано соотношение между (C/I) и k при отношении величины помехи к полной мощности шума на входе демодулятора —10 дБ и при различных рабочих условиях, измеренное путем лабораторного моделирования системы с дифференциальной четырехпозиционной ФМ (DEQPSK).

Из рис. 1 видны преимущества линейного режима работы и применения корректирующих кодов. Но что еще более важно, из этого рисунка видно, что критерий помехи, основанный либо на границе фактора увеличения коэффициента ошибок (k), либо на отношении мощностей полезного и мешающего сигналов (C/I), может уменьшить пользу координации между наземными системами и системами фиксированной спутниковой службы, которая могла бы быть получена в случае применения улучшенных характеристик аппаратуры или рабочих режимов. Однако этого не происходит при использовании критерия, выведенного из отношения мощностей шума на входе и выходе (I/N), и предел, основанный на разделении мощности шума на входе демодулятора, поэтому является предпочтительным.

В аналоговых системах (Рекомендация 356) максимально допустимая помеха от наземных станций берется на уровне 1/10 от полной мощности шума и считается, что это соотношение предварительно подходит также и для цифровых систем.

В связи с этим предлагается, чтобы критерий длительной помехи для защиты цифровых передач в системах фиксированной спутниковой службы от влияния наземных систем определялся** следующим образом:

- усредненная за любые десять минут мощность помехи*** не должна превышать в течение более 20% времени любого месяца 10% полной мощности шума на входе демодулятора, которая обуславливает коэффициент ошибок 10^{-6} .

Критерий помехи, указанный в пункте 1.1 раздела «РЕКОМЕНДУЕТ» Рекомендации 523, отнесен к максимально допустимым уровням помех в геостационарной спутниковой сети фиксированной спутниковой службы, использующей 8-разрядную ИКМ для телефонии, создаваемых другими сетями фиксированной спутниковой службы. В примечании 7 к Рекомендации 523 указывается, что пределы мощности помех в течение более 20% любого месяца должны обычно оцениваться, исходя из предположения, что уровень полной мощности шума является таким, которому соответствует указанный коэффициент ошибок в отсутствие замираний принимаемого сигнала. Этот вопрос подробно рассматривается в [МККР, 1982-86].

3. Критерии кратковременной помехи

В течение малого процента времени помеха земной станции от мешающего наземного передатчика может существенно увеличиваться относительно нормальной (для 80% времени) вследствие «благоприятных» для мешающего сигнала условий распространения. Следовательно, для таких малых процентов времени принятый цифровой сигнал может быть искажен вследствие неблагоприятных для него условий распространения либо вследствие «благоприятных» условий распространения мешающего сигнала, либо вследствие того и другого одновременно.

* k — соотношение между чистым коэффициентом ошибок и коэффициентом ошибок в отсутствие помех.

** В результате дальнейших исследований эти критерии могут быть изменены.

*** В настоящей Рекомендации предполагается, что помехи по своей природе являются непрерывными; случаи, когда помехи не являются непрерывными, например радиолокационные, не рассматривались.

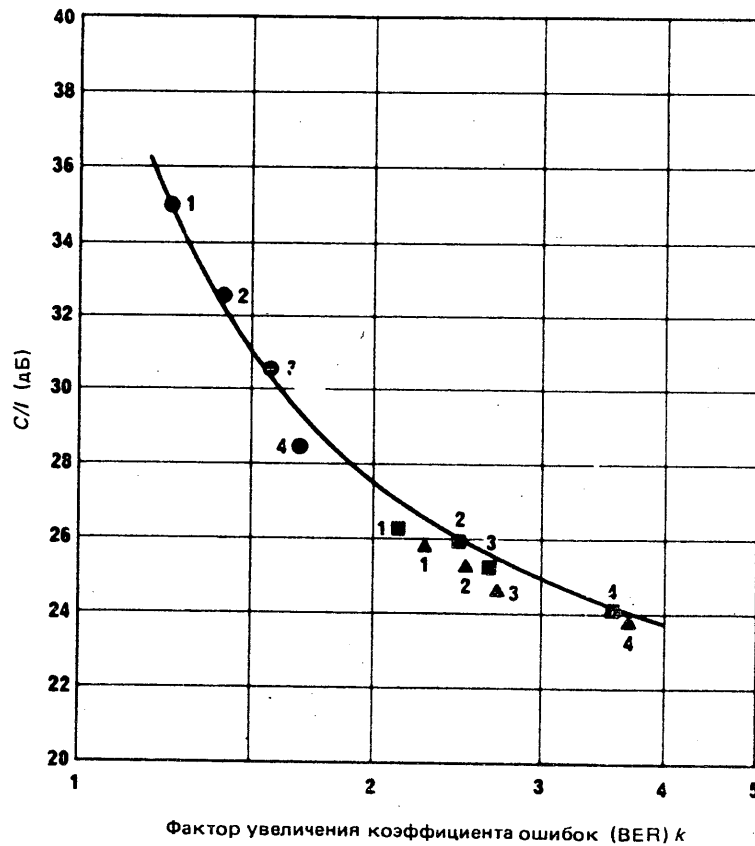


РИСУНОК 1 — Соотношение между C/I и k для различных режимов передач DEQPSK. Компонент помехи на входе демодулятора составляет 10%; чистый $BER = 10^{-6}$.
(Измерено при лабораторном моделировании)

- : без помехоустойчивого кодирования (FEC)
- : относительная скорость FEC 7/8
- ▲ : относительная скорость FEC 4/5
- 1: снижение рабочей точки передатчика земной станции относительно режима максимальной мощности составляет 3 дБ; то же на борту спутника — 0 дБ (3 дБ/0 дБ)
- 2: 6 дБ/0 дБ
- 3: 10 дБ/4 дБ
- 4: 14 дБ/14 дБ

Сплошная линия — усреднение экспериментальных результатов.

В большинстве случаев наиболее вероятно преобладание одного мешающего сигнала. Однако мало вероятно совпадение во времени помех такого большого уровня. Следовательно, в этом случае было бы предпочтительнее определять допустимую помеху как долю общего времени, в течение которого система может работать в ухудшенных условиях. Такой допуск величины помехи будет применен к двум нормам кратковременной помехи в Рекомендации 522; предусматриваются следующие пределы *, основанные на 1/10 того процента времени, который считается допустимым:

- мощность мешающего радиочастотного сигнала не должна вызывать превышение усредненного за одну любую минуту коэффициента ошибок 10^{-4} в течение более 0,03% времени любого месяца;
- мощность мешающего радиочастотного сигнала не должна вызывать превышение усредненного за одну любую секунду коэффициента ошибок 10^{-3} в течение более 0,005% времени любого года.

ССЫЛКИ

Документы МККР

[1982-86]: 4/12—9/11 (Соединенные Штаты Америки).

* В результате дальнейших исследований эти критерии могут быть изменены.

ОТЧЕТ 877-1

**КРИТЕРИИ ПОМЕХ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ СОВМЕСТНО С ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБОЙ**

(Вопросы 32/4 и 17/9)

(1982—1986)

1. Введение

Возможность совместного использования полос радиочастот фиксированными спутниковыми и наземными радиорелейными системами достаточно хорошо определена для аналоговых систем. Ожидается также, что совместное использование будет возможным, когда одна или обе системы являются цифровыми, то есть каждая система сможет работать удовлетворительно, несмотря на радиопомехи вследствие совместного использования общей полосы частот.

Совместное использование полос частот аналоговыми спутниковыми и наземными радиорелейными системами оказалось возможным благодаря установлению всеобъемлющих и практических критериев, основанных на знании механизма воздействия помех и их характеристик. Механизмы воздействия помех на цифровые и аналоговые системы совершенно различны, и поэтому есть основания считать, что критерии совместного использования частот также будут различаться. В настоящем Отчете рассматривается основа установления критериев совместного использования частот наземными цифровыми радиорелейными системами (см. примечание 1) и системами фиксированной спутниковой службы. Проведено всестороннее сравнение с аналоговыми системами, чтобы особо подчеркнуть необходимость другого подхода.

2. Особенности механизмов влияния помех в аналоговых и цифровых радиосистемах**2.1 Аналоговые радиосистемы**

В общем с целью установления всеобъемлющих и практических критериев совместного использования частот аналоговые системы в их линейной части характеризуются:

- линейным соотношением между шумом в основной полосе и отношением сигнал/шум (C/N) на входе приемника, обусловленным тепловым шумом;
- линейным соотношением между шумом в основной полосе и отношением сигнал/помеха (C/I) на входе приемника, обусловленным радиопомехой;
- тем, что шум в основной полосе, обусловленный тепловым шумом приемника, не зависит от радиопомехи. Аналогично шум в основной полосе, обусловленный радиопомехой, не зависит от теплового шума приемника;
- тем, что мощности двух компонентов шума в основной полосе аддитивны.

Эти характеристики были использованы для установления критериев совместного использования полос частот аналоговыми системами фиксированной спутниковой службы и наземными аналоговыми радиорелейными системами. Они не являются абсолютно правильными или применимыми в любых условиях, однако доказано, что они очень полезны и дают достаточно полное представление при решении проблем проектирования.

2.2 Цифровые радиосистемы

Цифровые системы ведут себя совершенно иным образом. Они характеризуются:

- наличием цифровых ошибок, обусловленных тепловым шумом приемника, которые приводят к появлению «шума» в сигнале основной полосы. Это явление характеризуется коэффициентом ошибок. Коэффициент ошибок и, следовательно, шум в основной полосе являются нелинейной функцией отношения C/N . На рис. 1 представлен пример типичного соотношения. Следствием этого соотношения является тот факт, что существует точно определенное отношение C/N , ниже которого сигнал оказывается непригодным из-за высокого уровня шума в основной полосе и/или кадрового расфазирования цифрового потока или канальных полос, то есть сигнал практически прерывается. Выше этого критического отношения C/N шум в основной полосе быстро становится пренебрежимо малым, и преобладающим оказывается основной ИКМ шум квантования. Обычно при увеличении отношения C/N на 1 дБ коэффициент ошибок будет уменьшаться в 10 раз, что соответствует уменьшению на 10 дБ шума в основной полосе частот, обусловленного ошибками. Необходимо обеспечивать, чтобы в проектируемой цифровой радиорелейной системе отношение C/N было выше критического в течение приемлемо высокого процента времени;

- тем фактом, что на практике помеха в большинстве случаев не сама вызывает ошибки, а увеличивает возможность теплового шума породить ошибки, на что указывает закрытие глазковой диаграммы в цифровом решающем устройстве. Традиционным способом описания влияния помехи является понятие ухудшения отношения C/N . Это понятие определяется как увеличение отношения C/N , требующееся для восстановления коэффициента ошибок при наличии помехи. В большей части практически значимого диапазона отношений C/N ухудшение, определяемое данной помехой (C/I), не зависит от C/N . Таким образом, на практике влияние помехи в большинстве случаев заключается в перемещении кривой коэффициента ошибок на рис. 1 вправо на величину, равную ухудшению отношения C/N . Это показано пунктирной кривой на рис. 1.

Следует отметить, что суммарное воздействие теплового шума и помехи в цифровых и аналоговых системах совершенно различно. В цифровых системах шум в основной полосе (ошибки), вызванный тепловым шумом, зависит от уровня помехи, и аналогично шум в основной полосе, связанный с помехой, в значительной степени зависит от уровня теплового шума. Здесь не может быть отдельной связи компонентов шума в основной полосе с тепловым шумом приемника или с помехой.

Следует отметить также, что для определения ухудшения отношения C/N недостаточно нормировать только отношение C/I . Фактическое ухудшение зависит как от амплитудного распределения помехи, так и от величины C/I . Теоретически для определения величины ухудшения требуется полное статистическое описание амплитуд помехи. Что касается реальных систем, то такую информацию не всегда можно получить. Одна попытка решения этой задачи путем уменьшения количества необходимых данных описана в [Rosenbaum и Glave, 1974], где показано, что для помехи с ограниченным максимальным значением может быть установлена достаточно близкая верхняя граница для коэффициента ошибок, если известны отношение C/I и пикофактор помехи. К сожалению, на сегодня очень мало известно даже о вероятных величинах пикофактора, имеющих место на практике, или что действительно помеха всегда имеет ограниченное максимальное значение.

Когда мощность помехи мала по сравнению с тепловым шумом, влияние ее на коэффициент ошибок часто может быть совершенно точно оценено, если считать помеху дополнительным тепловым шумом равной мощности. Этот метод также использовался в том случае, когда мощность помехи была равна или больше мощности теплового шума. Однако это может привести к предсказанию очень пессимистических результатов. Помеха с высоким уровнем мощности только тогда будет воздействовать подобно тепловому шуму, когда она имеет сходное амплитудное распределение. То есть, чтобы фактически вызвать ошибки, на что указывает мгновенное закрытие глазковой диаграммы, в этом распределении должны быть достаточные выбросы. Обычно не предполагается, что помехи от спутниковых систем будут такого характера, хотя об этом в настоящее время мало что определенно известно. Наиболее вероятно появление такой помехи с большими выбросами тогда, когда мешающий сигнал искажается фильтрацией или из-за условий распространения. Необходимы дополнительные сведения о природе помех, которые могут встретиться на практике. Эти сведения могут быть получены теоретическими расчетами, подкрепленными измерениями в реальных системах.

Если информация о статистике амплитуд мешающего сигнала отсутствует, то сложение мощностей помехи и теплового шума дает эффективную верхнюю границу коэффициента ошибок (см. примечание 2). Многие практические проблемы связаны с большим количеством источников помех. Сложение мощностей этих источников и теплового шума является эффективным методом установления допустимых уровней помех в сложных системах.

3. Применение характеристик шума и помех цифровых систем для определения общих критериев совместного использования частот

3.1 Аналоговые системы

Общие критерии помех для радиорелейных систем определяются на основе допущения незначительного снижения основных требований к качественным показателям. В аналоговых системах такими требованиями являются:

- предположение, что максимальная величина «длительного» шума в основной полосе частот приходится на условия распространения в свободном пространстве или почти в свободном пространстве;
- требование к уровню «кратковременного» шума вследствие замирания сигнала, верхний предел которого соответствует проценту времени, когда допускается значительное превышение шума в основной полосе по сравнению с допускаемым «длительным» шумом в пункте (а), выше.

Общие критерии совместного использования частот непосредственно связаны с этими основными требованиями:

- максимальная величина «длительного» шума от помех в основной полосе составляет обычно 10% допустимого «длительного шума», рекомендованного МККР для гипотетической эталонной цепи (ГЭЦ). Этот шум в основном обусловлен помехой непосредственно от спутниковых передатчиков, принятой в условиях свободного пространства;
- требование к уровню «кратковременного» шума, верхний предел которого соответствует проценту времени, когда допускается значительное превышение шума в основной полосе по сравнению с допускаемым длительным шумом. Этот процент времени обычно составляет 10% от времени, допускаемого для высокого уровня шума вследствие замирания сигнала и рекомендуемого МККР для ГЭЦ (Рекомендации 393 и 395). Допуск на кратковременный шум в основном связан с аномальными условиями распространения мешающих сигналов от передатчиков земных станций спутниковых систем.

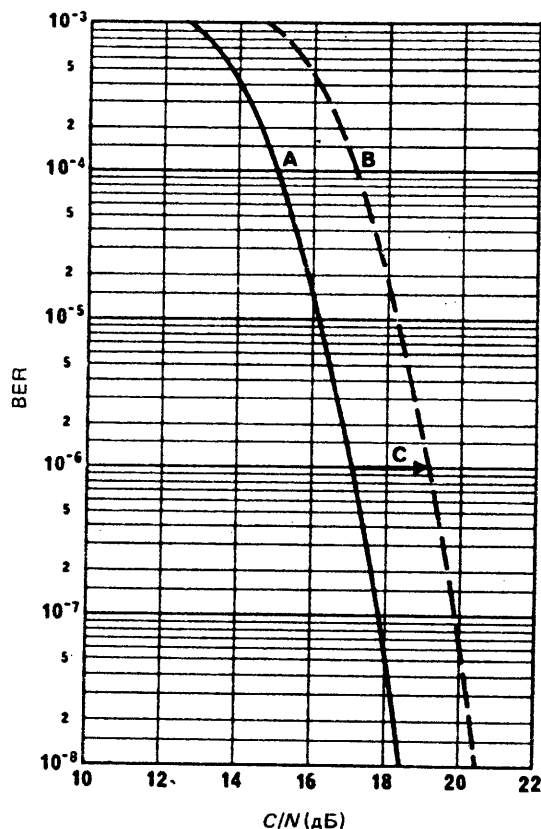


РИСУНОК 1 — Типичная зависимость коэффициента ошибок от C/N в цифровых радиорелейных системах

A: без помех
B: с помехой
C: ухудшение

На основе этих общих критериев совместного использования частот были определены детальные требования к допустимым отношениям C/I и процент времени, в течение которого эти отношения допускаются. Следует отметить, что, когда эти критерии применяются при проектировании реальной системы, нет необходимости в компромиссе каких-либо других запасов, которые проектировщик может выбрать, чтобы ввести их в систему. Такие запасы могут быть предусмотрены в системе, если обстоятельства требуют консервативного проекта или необходимо обеспечить более высокое качество, чем рекомендованное МККР.

3.2 Цифровые системы

Из рассмотрения цифровых систем следует, что общие критерии совместного использования частот должны определяться на основе допущения, что помеха вызывает определенное ухудшение основного(ых) требования(ий) к качественному(ым) показателю(ям). Как уже указывалось в пункте 2, в проекте цифровой радиорелейной системы доминирующей является необходимость поддержания отношения C/N на уровне выше критического в течение большого процента времени. Это достигается главным образом путем построения системы с большим запасом на замирания, обычно 35 дБ, в результате чего сигнал может быть ослаблен на эту величину прежде, чем будет достигнуто критическое значение C/N , ниже которого наступит перерыв в обслуживании. В условиях распространения в свободном пространстве или почти в свободном пространстве, которые существуют большую часть времени, коэффициент ошибок пренебрежимо мал и с позиций системного проектирования не является основным параметром (примечание 3). Если отношение C/N ниже критической величины, система обычно считается находящейся в состоянии неготовности. Обычно цифровая система, используемая для телефонии, считается находящейся в состоянии перерыва, если коэффициент ошибок превышает величину порядка 10^{-4} .

Критерии совместного использования частот для цифровых радиосистем должны определяться на основе допустимого ухудшения качества и готовности вследствие наличия помехи от спутниковой системы. Этот допуск должен быть выражен в виде приемлемой доли общего ухудшения качества и готовности, обусловленного неблагоприятными условиями распространения. Используя этот общий критерий, можно определить детальные требования к величине C/I для данного процента времени. Как и в аналоговых системах, применение этого критерия не должно препятствовать проектированию систем с дополнительными запасами для обеспечения лучших качественных показателей.

Следует особо отметить, что нельзя определять критерии совместного использования частот величиной помехи, приводящей к данному коэффициенту ошибок. Фактический уровень помехи, необходимый для данного коэффициента ошибок, в значительной степени зависит от реального теплового шума и конкретного характера помехи в данный момент времени. Поэтому такой метод мог бы привести к разработке проектов систем, качественные показатели которых, например время простоя, могли бы легко изменяться от приемлемых до совершенно неприемлемых вследствие незначительных изменений условий работы системы. Кроме того, что также важно, такой метод мог бы привести к утрате разумных запасов, которые проектировщик заложил в систему. Фактически, с точки зрения допустимой помехи от спутниковых систем консервативно спроектированная система легко может оказаться в невыгодном положении по сравнению с системой, спроектированной менее консервативно.

4. Некоторые аспекты проблем реальных систем

4.1 Основные аспекты

Существуют два механизма, посредством которых помехи от спутниковых систем могут увеличивать время простоя наземных цифровых радиорелейных систем:

- «длительная» (например, в течение 80% времени любого месяца) помеха малого уровня от спутника или передатчика земной станции, которая вызывает постоянное ухудшение отношения C/N (как указано в пункте 2) и уменьшает запас на замирания, тем самым увеличивая время простоя;
- «кратковременная» помеха высокого уровня вследствие аномальных условий распространения сигнала от передатчика земной спутниковой станции. Эта помеха вызывает существенное ухудшение отношения C/N или может сама явиться причиной ошибок, если обладает достаточными выбросами, как указывалось в пункте 2.

Считается, что эти два механизма независимы и не действуют одновременно в течение значительного времени. Поэтому периоды простоя, определяемые каждым из них, можно просто складывать.

4.2 Аспекты C/I

Для выполнения требований в C/I и в отсутствие какой-либо подробной информации о природе помехи следует предположить, что помеха ведет себя как тепловой шум равной мощности. Такой подход близок к очень точному для «длительной» помехи, которая на практике будет равна или меньше мощности теплового шума. Однако в условиях «кратковременных» помех возникают значительные трудности. Поведение цифровых систем в условиях помех очень высокого уровня, высокого коэффициента ошибок и низкого уровня теплового шума не до конца понято и не полностью охарактеризовано. Поэтому точно рассчитать приемлемые отношения C/I очень сложно даже для конкретных условий, не говоря уже о попытках обобщения с целью разработки рекомендаций или инструкций. По-видимому, в настоящее время остается лишь предположить, что помеху можно рассматривать как тепловой шум, считая, что такой подход дает если и не абсолютную, то во всяком случае эффективную верхнюю границу коэффициента ошибок.

Не следует, однако, ожидать, что результаты, предсказанные с помощью удобной трактовки подобия воздействия помехи воздействию шума, будут точно отражать происходящее в реальной системе. Опубликованные теоретические соотношения между коэффициентом ошибок, тепловым шумом и помехой согласуются с реальными значениями при условии, что можно определить характер помехи и ее уровень на 10 дБ и более ниже уровня сигнала. Поэтому любые выводы о поведении коэффициента ошибок, полученные при таком упрощенном подходе, как приравнивание помехи к тепловому шуму, всегда должны проверяться на соответствие теоретическим расчетам. При высоком коэффициенте ошибок, вызванных помехой большого уровня, теоретические расчеты могут оказаться не очень полезными, и поэтому следует прибегать к сопоставлению прогнозов с результатами измерений. Необходимо, чтобы исследования были направлены на решение проблемы перевода общего критерия совместного использования частот, предложенного в настоящем Отчете, в допустимые отношения C/I и процент времени, в течение которого эти отношения допускаются.

4.3 Распределение простоев

Вообще помеха может возникать в ряде ретрансляторов системы. В аналоговых системах из-за присущей им линейности допустимый шум может, по крайней мере теоретически, распределяться между ретрансляторами любым образом. Административные сложности могут, однако, наложить ограничения на эту процедуру. Теоретически в цифровых системах полное время простоя также произвольно может распределяться между несколькими ретрансляторами. Следует тщательно оценивать предложения, в соответствии с которыми все время простоя допускается относить к одному ретранслятору с относительно высоким уровнем помехи. Но и в этом случае административные трудности могут стать причиной ограничения распределения допустимого времени простоя.

4.3.1 Расчет J для защищенных систем

Если предположить, что полное время простоя из-за длительной помехи относится к одному пролету, подверженному воздействию помех от земных станций, то допустимая величина времени простоя этого пролета, обусловленного воздействием теплового шума и помехи, в 6,56 раза больше, чем на остальных пролетах гипотетического эталонного цифрового тракта (ГЭЦТ). Это можно подтвердить на основе предположения, что общая допустимая величина помехи в 50-пролетном ГЭЦТ определяет 10% полного допустимого времени простоя, установленного в Рекомендации 615:

$$p_u = 0,9 p_u \frac{49}{50} + 0,9 p_u \frac{X}{50} \quad \%,$$

где

p_u — полное допустимое время простоя в ГЭЦТ, выраженное в процентах времени.

Следовательно, $X = 6,56$.

Если в пролете, подверженном воздействию помехи, организовано резервирование по системе 1:1 и если предположить, что замирания в основном и резервном каналах некоррелированы, вероятность простоя является произведением вероятностей простоя каждого из радиочастотных каналов системы. Это справедливо как для пролетов, подверженных воздействию помехи, так и для пролетов, свободных от помех. Для конкретного канала в подверженном воздействию помехи пролете величина X будет составлять $\sqrt{6,56} = 2,56$.

Если J — выраженное в децибеллах отношение помеха/тепловой шум, где помеха предполагается подобной шуму, увеличение времени простоя из-за помехи может быть выражено в относительных единицах следующим равенством, предполагающим рэлеевскую статистику замираний:

$$X = (1 + 10^{J/10}).$$

Поскольку $X = 2,56$, $J = 1,93$.

Соотношение 1:1 может быть обеспечено пространственным и частотным разносом; в любом случае можно предположить, что помеха воздействует на оба канала — основной и резервный — одинаково.

Заметим, что, если разнос не используется, $X = 6,56$ и, следовательно, $J = 7,5$.

4.3.2 Количество источников помех

Для разработки координационных контуров (см. Отчет 382) необходимо определить количество источников неодновременных кратковременных помех в эталонной полосе частот, обусловленных аномальными условиями распространения. Для малой продолжительности такие помехи можно считать некоррелированными. Общая продолжительность таких помех должна быть меньше, чем допустимая продолжительность, в течение которой могут быть превышены пороговые условия, как это определено в Рекомендации 615. Количество таких источников является функцией числа земных станций, количества космических станций, с которыми они могут работать, и ширины их полосы по отношению к эталонной полосе. Поэтому, применяя метод координационных контуров в качестве полезного приближения, учитываются только те излучения мешающих сигналов, которые попадают в основной лепесток приемной антенны. При этом, несмотря на относительно большое количество земных и космических станций, установленных в последние годы, количество «источников» помех поддается учету. Для определения подходящей величины необходимы дальнейшие исследования. Временно предлагается величина, равная 3.

4.4 Совместное использование частот при реверсной работе

В тех полосах частот, в которых фиксированная спутниковая служба работает в реверсном режиме, влияние помехи на полное время простоя и неготовность радиорелейных систем, использующих те же полосы частот, проявляется в виде трех независимых механизмов. Этими тремя механизмами являются уменьшение запаса на замирание сигнала вследствие «длительной» помехи от космической станции, уменьшение запаса на замирание сигнала вследствие «длительной» помехи от земной станции и вклад «кратковременной» помехи высокого уровня, обусловленной аномальными условиями распространения мешающих сигналов от передающих земных станций (см. пункт 3.1). Влияние этих трех механизмов на радиорелейные системы рассматривается в Отчете 1005.

5. Заключение

В настоящем Отчете изложены следующие важные положения:

— допустимые величины качества и готовности при неблагоприятных условиях распространения являются доминирующим требованием при проектировании цифровой радиорелейной системы;

- в цифровой системе не может быть независимого соединения компонент шума в основной полосе частот, обусловленных тепловым шумом приемника и помехой;
- критерии помехи для совместного использования частот основаны на допущении определенных ухудшений качества и готовности, обусловленных неблагоприятными условиями распространения;
- критерии совмещения должны быть такими, чтобы они не уменьшали какие-либо дополнительные запасы, необходимые проектировщику для того, чтобы система удовлетворяла общим нормативам качества;
- допустимое ухудшение качества и готовности наземной цифровой радиорелейной системы вследствие помех от спутниковых систем фиксированной спутниковой службы должно выражаться в виде допустимой доли общего ухудшения качества и готовности из-за неблагоприятных условий распространения.

Примечание 1.— Цифровыми системами являются системы, в которых передача телефонии осуществляется преобразованием речевого сигнала в формат 8-разрядной ИКМ с временным разделением каналов. Многоканальный цифровой сигнал обычно кодируется еще раз, часто с использованием большого числа уровней, чтобы модулировать радиосигнал. Предполагается, что цифровой сигнал в каждом ретрансляторе полностью регенерируется. Основной метод, рассмотренный в настоящем Отчете, применим также к цифровым системам других служб.

Примечание 2.— Тепловой шум или шум Гаусса с точки зрения коэффициента ошибок обладает не худшей статистикой. Розенбаум и Глэйв [1974] показали, что даже в случае ограниченной максимальной помехи, такой, что она сама не вызывает ошибок, коэффициент ошибок может быть хуже, чем при тепловом шуме той же мощности. Предположительно, это даже более вероятно, если помеха не ограничена по максимуму согласно [Rosenbaum и Glave, 1974]. Поэтому теоретически метод эквивалентного теплового шума не дает истинную абсолютную верхнюю границу коэффициента ошибок. Однако есть основания сомневаться (по опыту с реальными системами) относительно применимости на практике абсолютной верхней границы, так как обычно мало вероятно, что помеха от спутниковых систем будет содержать очень большие всплески. Предполагается, что это справедливо даже в отношении помехи, подвергшейся различным искажениям вследствие фильтрации и влияния условия распространения. По этой причине можно считать, что тепловой шум эквивалентной мощности дает вполне пригодную верхнюю границу.

Примечание 3.— Опыт с реальными системами показывает, что аппаратура цифровых радиорелейных линий обладает остаточным, очень низким коэффициентом ошибок (лучше, чем, скажем, 10^{-16}), который не зависит от отношения C/N . Это связано с фазовым дрожанием восстановленного несущего колебания, используемого при когерентном детектировании. Кроме того, оказывается, что этот остаточный коэффициент ошибок может быть ухудшен помехой. При наихудшей по уровню из ожидаемых в цифровых системах длительных помех, такой как появляющаяся при использовании кроссполаризационной развязки для разделения несущих одного частного канала, коэффициент ошибок по битам увеличивался на три порядка. Однако остаточный коэффициент ошибок все еще очень мал (скажем, лучше, чем 10^{-13}) и поэтому вполне приемлем. Это явление еще до конца не понято. Хотя в настоящее время коэффициент ошибок в условиях распространения, соответствующих свободному пространству (который, вероятно, и есть остаточный коэффициент ошибок), не считается основным системным параметром, целесообразно, рассматривая влияние помехи от спутниковых систем, быть на уровне понимания этого явления. В настоящее время не известно, являются ли наблюдаемые эффекты фундаментальными по своей природе или обусловлены характеристиками конкретных типов аппаратуры.

ССЫЛКИ

ROSENBAUM, A. S. and GLAVE, F. E. [January, 1974] An error probability upper-bound for coherent phase shift keying with peak-limited interference. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-22, 1, 6—16.

ОТЧЕТ 1143*

**СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СЛУЖБОЙ В СООТВЕТСТВИИ С ПОЛОЖЕНИЯМИ
СТАТЬИ 14 РЕГЛАМЕНТА РАДИОСВЯЗИ В РАЙОНЕ 2**

(Вопросы 32/4 и 17/9, Исследовательские программы 32А/4, 32С/4 и 32F/4)

(1990)

1. Введение

Всемирная административная радиоконференция 1979 года приняла такие решения о распределении полос частот, что во многих случаях совместное использование полос частот регулируется положениями Статьи 14 Регламента радиосвязи. Несколько последних ВАКР изменили некоторые положения и в ряде случаев приняли дополнительные распределения полос частот, опять-таки регулируемые положениями Статьи 14. В этой Статье Регламента радиосвязи, озаглавленной "Дополнительная процедура, которую следует применять в случаях, когда в примечании к Таблице распределения частот требуется согласование с какой-либо администрацией", предписывается, что администрация, желающая использовать конкретные радиослужбы в обозначенных полосах частот, ищет согласия затронутых администраций, использующих другие службы в тех же полосах частот, в соответствии с Таблицей распределения частот. В Статье указано, что МКРЧ должен пытаться определить администрации, чьи службы могут быть затронуты. Однако МКРЧ в своих Правилах процедуры указал, что ему было трудно разработать правила для такого определения, не прибегая к помощи крупного вычислительного центра. Следовательно, технические методологии и подходы для определения затронутых администраций были бы полезны для того, чтобы уменьшить бремя администраций и МКРЧ, облегчив применение Статьи 14.

2. Критерии для облегчения применения Статьи 14 в отношении фиксированной спутниковой службы в полосе 11,7—12,2 ГГц в Районе 2

Полоса частот 11,7—12,2 ГГц распределена фиксированной спутниковой службе в Районе 2 на первичной основе. Однако это распределение сопровождается ограничениями, изложенными в пункте 839 Регламента радиосвязи, в котором предписывается, что использование этой полосы фиксированной спутниковой службы подлежит предварительному согласованию между заинтересованными администрациями и теми, которые имеют запланированные или действующие в соответствии с Таблицей службы, которые могут быть затронуты.

* Технические критерии данного Отчета не применяются в Районах 1 и 3.

2.1 Критерии фиксированной спутниковой службы для определения затронутых администраций, использующих фиксированную службу, при применении Статьи 14 в полосе 11,7—12,2 ГГц в Районе 2

Полоса 11,7—12,2 ГГц на равной основе совместно используется фиксированной спутниковой службой и фиксированной службой в Районе 2, за исключением Канады, Мексики и Соединенных Штатов Америки, где фиксированная служба имеет вторичную основу (ВАКР ОРБ-85). Полоса 11,7—12,2 ГГц распределена также фиксированной службе на первичной основе в Районах 1 и 3. Сегмент этой полосы 12,1—12,2 ГГц совместно используется фиксированной спутниковой службой и фиксированной службой в Бразилии и Перу (ВАКР ОРБ-85).

Равноправные первичные распределения фиксированной спутниковой службе (космос—Земля) и фиксированной службе обыкновенно защищены от помех друг другу требованием координации между индивидуальными приемными земными станциями и передающими наземными станциями и введением ограничений на плотности потока мощности для фиксированной спутниковой службы, чтобы устранить необходимость детальной координации с наземными приемными станциями.

Координация между земной и наземной станциями может быть необходима только в соответствии с положениями Статьи 11, раздел III. С другой стороны, в рассматриваемой полосе нет ограничений на плотности потока мощности, и они здесь не предлагаются. Однако, чтобы облегчить применение процедуры Статьи 14, здесь предлагается использовать значения плотности потока мощности для определения затронутой администрации.

Известно, что ограничения плотности потока мощности существуют в соседней полосе, распределенной для фиксированной спутниковой службы в Районе 2, — в полосе 10,7—11,7 ГГц, защищая от помех фиксированную службу. Это следующие значения:

—150 дБВт/м² в любой полосе шириной 4 кГц, для углов прихода излучения между 0 и 5° над горизонтальной плоскостью;

—150 + 0,5 (δ - 5) дБВт/м² в любой полосе шириной 4 кГц, для угла прихода δ (в градусах) между 5 и 25° над горизонтальной плоскостью;

—140 дБВт/м² в любой полосе шириной 4 кГц, для углов прихода между 25 и 90° над горизонтальной плоскостью,

где δ — угол прихода излучения над горизонтальной плоскостью.

В предположении, что излучения космических станций в Районе 2 в полосе 11,7—12,2 ГГц с плотностью потока мощности, не превышающей указанные выше значения, на территории затронутых администраций не вызовут неприемлемых помех в наземных системах Района 2, вышеуказанные значения плотности потока мощности можно использовать в качестве критерия для определения затронутых администраций, использующих или планирующих использовать фиксированную службу в Районе 2, чтобы облегчить применение Статьи 14.

3. Заключение

В полосе 10,7—11,7 ГГц имеются значения плотности потока мощности для ФСС, которые защищают фиксированную службу. Эти значения могли бы быть использованы для определения затронутых администраций и облегчения применения Статьи 14.

ОТЧЕТ 386-3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЛЮБОЙ ПОЛОСЕ ШИРИНОЙ 4 кГц, ИЗЛУЧАЕМОЙ В НАПРАВЛЕНИИ
НА ГОРИЗОНТ ЗЕМНЫМИ СТАНЦИЯМИ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ,
ИСПОЛЗУЮЩИМИ СОВМЕСТНО С НАЗЕМНЫМИ СЛУЖБАМИ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ НИЖЕ 15 ГГц**

(Вопросы 32/4 и 17/9)

(1966—1970—1974—1982)

1. Требования к системам фиксированной спутниковой службы

При рассмотрении предела мощности, излучаемой земными станциями в горизонтальном направлении, важно иметь в виду потребности в системах фиксированной спутниковой службы, которые можно обоснованно предвидеть. Это должны быть системы многоканальной телефонии, телевизионные и звуковые системы. Необходимо учитывать, что для передачи таких видов сигналов, как тональная телеграфия, данные, тональные сигналы для испытаний и сигнализации, могут использоваться телефонные каналы, когда это влияет на максимальную мощность передачи в любой полосе шириной 4 кГц. Такая ширина полосы подходит для защиты аналоговых радиорелейных систем с угловой модуляцией от воздействия мешающих сигналов. Любой установленный предел мощности должен быть подходящим при различных методах модуляции, разном числе телефонных каналов и разных размерах антенн земных станций. Необходимо также учитывать характеристики используемых спутников, включая шумовые характеристики оборудования и коэффициент усиления бортовых антенн. На окончательный результат также серьезно влияют эксплуатационные требования к запасу на замирания и к рассеянию энергии несущей.

2. Эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.м.) в основном луче земной станции

В данном пункте рассматриваются требования к мощности для двух видов многоканальных телефонных систем, которые являются иллюстрацией систем, вероятно требующих наибольшего значения мощности передачи в любой полосе шириной 4 кГц. Предполагается, что значения мощности передач телевидения с частотной модуляцией не будут превышать значений мощности телефонных передач с равными основными полосами, если при этом применяются соответствующие методы рассеяния энергии.

Ниже приводятся общие уравнения для определения допустимых уровней мощности, излучаемой земными станциями. Реальные значения мощности можно рассчитать, подставив значения, соответствующие рассматриваемой спутниковой системе.

2.1 Системы с частотной модуляцией

Требуемая полная мощность сигнала P_r на входе приемника спутника задается уравнением:

$$P_r = S/N + 10 \log (kTb) - P - 20 \log (f_r/f_m) \quad \text{дБВт}, \quad (1)$$

где

S/N : отношение сигнал/шум, соответствующее принятому значению шума на участке вверх в полосе частот шириной b (обычно в телефонном канале) (дБ);

k : постоянная Больцмана $1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К;

T : шумовая температура спутниковой приемной системы (К);

b : ширина полосы рассматриваемого канала (Гц). Для телефонного канала $b = 3100$ Гц;

P : улучшение из-за предскажений (дБ);

f_r : эффективная девиация частоты сигнала (МГц), вызванная испытательным тоном (0 дБм0);

f_m : верхняя частота основной полосы (МГц).

Для обеспечения требуемого значения мощности сигнала на входе приемника спутника земная станция должна излучать в полосе шириной 4 кГц следующую э.и.м., D_s :

$$D_s = P_r - (28 + 10 \log dF) + M_u - 20 \log (\lambda/4\pi R) - G_r + 3 \quad \text{дБВт}, \quad (2)$$

где

3 дБ добавляются при слабой нагрузке, когда применяются методы спектрального рассеяния согласно Отчету 384, пункт 4;

M_u : запас мощности на участке вверх (дБ);

λ : длина волны сигнала (м);

R : расстояние до спутника (м);

G_r : коэффициент усиления приемной спутниковой антенны (дБ).

Второй член в уравнении для D_s устанавливает наивысшее встречающееся отношение между мощностью в полосе 4 кГц и полной мощностью сигнала (см. Отчет 384, приложение I, пункт 1) в предположении, что спектральное распределение радиочастотного сигнала является гауссовым со среднеквадратичной девиацией частоты многоканальным сигналом:

$$dF = f_r L \quad \text{МГц.} \quad (3)$$

где

$$L = 0,178 \sqrt{n};$$

n = число учитываемых телефонных каналов.

В настоящее время изучаются методы рассеяния энергии, предназначенные для ограничения высоких значений спектральной плотности при слабой нагрузке.

2.2 Однополосные системы с амплитудной модуляцией (ОБП/АМ)

Мощность ОБП/АМ системы, приходящаяся на один канал на входе спутникового приемника, определяется выражением

$$P_r = S/N + 10 \log (kTb) \quad \text{дБВт,} \quad (4)$$

которая при обычном разnose каналов 4 кГц дает требуемую э.и.м. земной станции в полосе шириной 4 кГц, определяемую из выражения

$$D_s = P_r - 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) - G_r + M_u \quad \text{дБВт} \quad (5)$$

для сигнала возбуждения 0 дБм0. Необходимо отметить, что в телефонных цепях существует значительное различие уровней мощности разговорных сигналов, однако считается целесообразным использовать величину 0 дБм0 в качестве максимальной мощности в телефонном канале, усредненной за время интегрирования в несколько секунд.

3. Мощность, излучаемая в направлении на горизонт в любой полосе шириной 4 кГц

Поскольку земные станции строятся обычно с учетом экранирующего действия местности, мощность, излучаемая в горизонтальной плоскости, как это определено выше, не имеет большого практического значения. Вместо этого в целях более точного описания характеристик излучения земной станции следует определять эффективную мощность, излучаемую в направлении на физический горизонт в любой полосе шириной 4 кГц.

Необходимо определить наименьший встречающийся угол φ между основным лучом антенны и физическим горизонтом, поскольку уменьшение этого угла сопровождается недопустимым ростом шумовой температуры приемной системы; для многих местоположений с увеличением глубины замираний принимается минимальное значение $\varphi = 1^\circ$.

При данном минимальном угле места ϵ основного луча земной станции φ рассчитывается из выражения $\varphi = \epsilon - \theta_E$, где θ_E — угол места горизонта при том же азимуте, для которого взят угол ϵ . Все углы выражаются в градусах.

Для заданного φ можно рассчитать э.и.м. в направлении на горизонт в любой полосе шириной 4 кГц:

$$\begin{aligned} E_H &= D_s - G_s + 32 - 25 \log \varphi \quad \text{дБВт (при } 1^\circ \leq \varphi \leq 48^\circ), \\ &= D_s - G_s - 10 \quad \text{дБВт (при } 48^\circ < \varphi \leq 180^\circ), \end{aligned} \quad (6)$$

где G_s — максимальное усиление антенны земной станции.

Выражение для E_H выводится из уравнения, описывающего характеристику антенны земной станции с большим раскрытием, приведенную в Отчете 391, при этом применимы те же оговорки относительно обоснованности данного уравнения, что и в этом Отчете. В частности, при некоторых значениях φ усиление реальной антенны может превосходить на несколько децибел значение, полученное из данного уравнения.

Угол места горизонта θ_E должен отсчитываться по крайней мере от высоты центра антенны.

На рис. 1 представлены значения э.и.м. в направлении на горизонт в зависимости от угла разрешения при разных значениях параметра $D_s - G_s$, представляющего собой плотность мощности на входе антенны в любой полосе шириной 4 кГц.

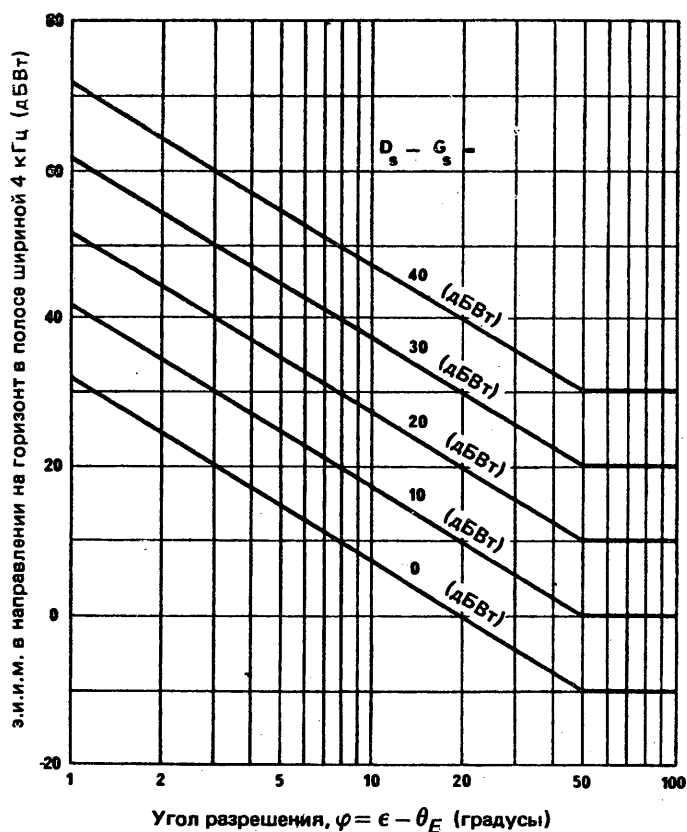


РИСУНОК 1 — Значения э.и.м. в направлении на горизонт в зависимости от угла разрешения
Параметр $D_s - G_s$ (дБВт)

Значения $D_s - G_s$, не лежащие ни на одной из показанных кривых, могут быть получены путем линейной интерполяции в области значений, выраженных в децибеллах. В приложении I приводятся два характерных примера вывода значений $D_s - G_s$.

Значение э.и.м. в горизонтальной плоскости в любой полосе шириной 4 кГц около 35 дБВт для антенны с углом места основного луча 3° обычно достаточно для нормальной работы существующих систем фиксированной спутниковой службы. Однако требуется допустить некоторый запас для будущих систем, которые используют антенны меньшего диаметра, большее число каналов и другие методы модуляции. Пределы, установленные Всемирной административной конференцией радиосвязи, Женева, 1979 год, по-видимому, удовлетворяют этим требованиям.

Конкретные пределы э.и.м. земных станций указаны в пунктах 2540—2548.1 Статьи 28 Регламента радиосвязи.

4. Рассмотрение модулирующих сигналов, отличных от телефонных, либо видов модуляции, отличных от частотной или однополосной модуляции

Если земная станция предназначена исключительно для работы в системах фиксированной спутниковой службы, использующих модулирующие сигналы, отличные от телефонных, в частности телевизионные сигналы, или применяющих методы модуляции, отличные от частотной или однополосной модуляции, то расчет значений D_s может ограничиваться такими модулирующими сигналами либо методами модуляции.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Ниже приводятся примеры использования в уравнениях значений параметров, репрезентативных для 1200-канальной системы фиксированной спутниковой службы:

Параметр	ЧРК-ЧМ	ОБП-АМ
S/N вверх (дБ) ⁽¹⁾	56 ⁽¹⁾	56 ⁽¹⁾
T (К)	1500	1500
P (дБ)	2 · 5	
f_r (МГц)	1 · 1	
f_m (МГц)	5 · 0	
P_r (дБВт)	—95	—106
dF (МГц)	6 · 8	
M_u (дБ)	3 · 0	3 · 0
λ (м)	5×10^{-2}	5×10^{-2}
R (м)	$4 \cdot 16 \times 10^7$	$4 \cdot 16 \times 10^7$
G_r (дБ)	13 · 0	13 · 0
D_s (дБ(Вт/4 кГц))	62 · 1	84 · 4
G_s (дБ)	64 · 0	64 · 0
$D_s - G_s$ (дБ(Вт/4 кГц))	—2	20

(¹) Соответствует мощности шума 1400 пВт на участке вверх.

ОТЧЕТ 387-6

**ЗАЩИТА НАЗЕМНЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ ОТ ПОМЕХ,
СОЗДАВАЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЯМИ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ФИКСИРОВАННОЙ
СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ, В СОВМЕСТНО ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПОЛОСАХ ЧАСТОТ
МЕЖДУ 1 И 23 ГГц**

(Вопрос 17/9 и Исследовательская программа 32С/4)

(1966—1970—1974—1978—1982—1986—1990)

1. Введение

Излучения от космических станций будут создавать помехи наземным радиорелейным системам в совместно используемых полосах частот. Нежелательная энергия, способная создавать помехи, будет попадать в изменяющемся количестве через основной или боковые лепестки антенн наземных станций, входящих в радиорелейную систему.

Расчет эффекта воздействия помехи от излучения данной космической станции на одну радиорелейную систему может быть выполнен, но расчет суммарного эффекта воздействия помех от многих космических станций на каждую из большого числа существующих и будущих радиорелейных систем является неразрешимой задачей. В связи с этим и ввиду сравнительной однородности характеристик радиорелейных систем прямой видимости признано возможным обеспечить защиту наземных радиорелейных систем путем введения общих ограничений на излучения от космических станций.

Ограничения выражаются через максимально допустимые значения плотности потока мощности в эталонной полосе частот, создаваемого на поверхности Земли излучением любой одной космической станции в предполагаемых условиях распространения в свободном пространстве.

При определении значений максимально допустимой плотности потока мощности применяются следующие целевые критерии:

- значения должны быть достаточно низкими, для того чтобы избежать превышения рекомендуемых пределов максимально допустимой помехи, создаваемой существующим и будущим наземным радиорелейным системам, использующим те же частоты;
- значения должны быть достаточно высокими, для того чтобы позволить космическим системам связи удовлетворительно работать.

2. Метод определения максимально допустимой плотности потока мощности

2.1 Критерий помехи

Для определения значений максимально допустимой плотности потока мощности были использованы приведенные в Рекомендации 357 пределы максимально допустимой помехи в телефонном канале аналоговых радиорелейных систем прямой видимости, используемых для передачи многоканальной телефонии с помощью угловой модуляции. Доказано, что для таких систем, работающих обычно на частотах ниже 15 ГГц, эталонная ширина полосы 4 кГц является подходящей при рассмотрении влияния нежелательных сигналов на входе приемников наземных станций гипотетической эталонной цепи МККР.

Максимально допустимые значения помехи, приводимые в Рекомендации 357, адекватны значениям, необходимым для защиты таких радиорелейных систем при передаче телевизионных сигналов.

В условиях отсутствия рекомендаций для цифровых радиорелейных систем прямой видимости, работающих на частотах выше 15 ГГц через одну трассу с незначительным рэлеевским замиранием, можно временно предположить, что отношение мощности сигнала к суммарной помехе должно в течение всего времени, за исключением 20%, превышать значение 30 дБ на входе любого приемника наземной радиорелейной системы и что для малого процента времени, в течение которого полезный сигнал может быть ослаблен главным образом из-за дождя, мощность суммарной помехи на входе любого приемника наземной радиорелейной системы не должна превышать 10% от мощности теплового шума в этой точке*. Поскольку было показано, что цифровые модулированные сигналы подвергаются воздействию суммарной помехи в пределах всей ширины занимаемой полосы частот, и поскольку значения ширины полосы частот, встречаемые на практике, будут, скорее всего, большими, в качестве эталонной была принята ширина полосы, равная 1 МГц.

2.2 *Модели систем*

Для оценки влияния помех, вызываемых излучением от космических станций, на наземные радиорелейные системы прямой видимости с учетом ожидаемого расширения и развития как космических, так и наземных систем необходимо создать подходящие модели для обоих типов систем.

2.2.1 *Параметры модели наземной радиорелейной системы прямой видимости*

Технические характеристики модели радиорелейной системы прямой видимости описываются параметрами, приведенными в приложениях I и II.

Для систем, обеспечивающих передачу многоканальной телефонии с помощью угловой модуляции, можно допустить, что мощность теплового шума и мощность помехи (до и после детектирования) аддитивны на всех трассах передачи, входящих в систему. Для систем, обеспечивающих передачу цифровых сигналов, такое предположение не подходит.

2.2.2 *Орбитальные параметры модели космических систем*

Рассматриваются только характеристики передающих космических станций. В силу инвариантности геометрических соотношений между данной наземной радиорелейной системой и космической станцией, находящейся на геостационарной орбите, наиболее жесткие условия в аспекте воздействия помехи будут иметь место при предположении, что одна или несколько геостационарных космических станций расположены в пределах основных лучей наземных приемных станций, входящих в радиорелейную систему.

Поэтому был сделан вывод, что модель космической системы должна быть лучше всего представлена передающими космическими станциями, заполняющими видимую с наземной системы часть геостационарной орбиты и расположенными через равные интервалы (угловой разнос — 3 и 6° дуги, что соответствует двум случаям разной степени жесткости).

Влияние воздействия помехи, вызываемой излучениями космических станций, расположенных на негеостационарной орбите, рассматривается в § 4.

2.3 *Зависимость пределов плотности потока мощности от угла прихода излучения*

Антенны радиорелейных станций обычно направлены почти горизонтально. Поэтому, как правило, они наиболее чувствительны к потоку мощности помехи, приходящему в тангенциальных (или почти тангенциальных) направлениях к поверхности Земли. С ростом угла прихода помехи диаграммы излучения антенны радиорелейной станции обеспечивают увеличение развязки. Следовательно, можно допустить увеличение плотности потока мощности с ростом угла прихода. При определении степени допустимого увеличения было обращено должное внимание на характеристики некоторых типов антенн радиорелейных станций, например перископических антенн, обладающих слабой избирательностью боковых лепестков при углах до 90° от оси основного луча.

* Временное значение 30 дБ основано на цифровых системах с 4-позиционной ФМ, которые главным образом применяются в настоящее время. Для возможных в будущем 8- или 16-позиционных систем ФМ эту величину, возможно, придется пересмотреть.

Различные исследования [May и Pagones, 1971; Cheilik, 1983] показывают, что соотношение между допустимой плотностью потока мощности и углом прихода общего вида, показанное на рис. 1, приемлемо, если рассматривать защиту радиорелейных систем. Допущение более высоких значений плотности потока мощности при больших углах прихода оказывается также, как правило, выгодным для систем фиксированной спутниковой службы, использующих антенны с узкими лучами. Однако, поскольку в отношении спутниковых станций должны соблюдаться пределы плотности потока мощности при всех углах прихода, не всегда оказывается практически возможным проектировать спутниковые антенны, которые могут полностью использовать ослабление пределов плотности потока мощности при повышенных углах места.

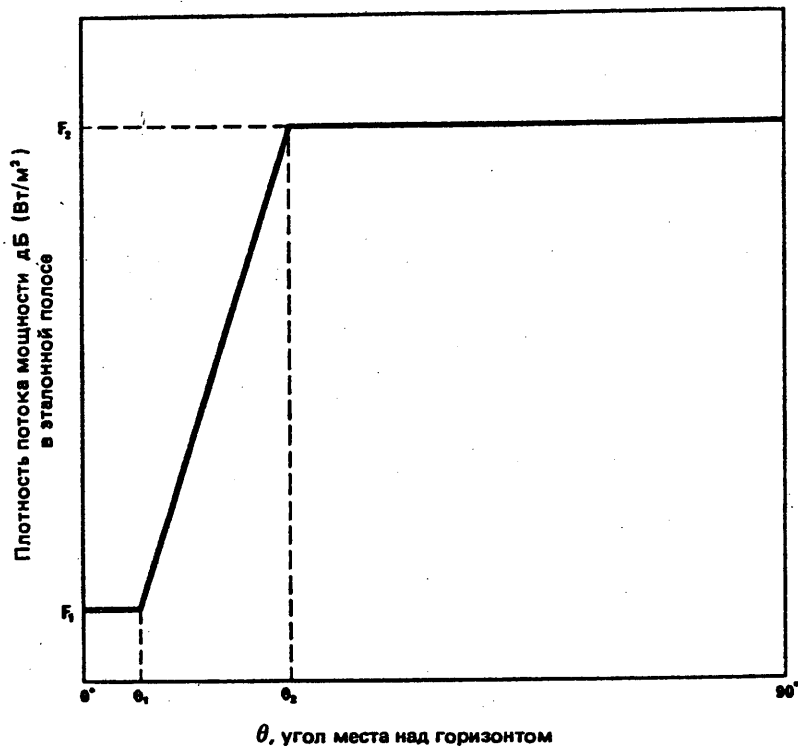


РИСУНОК 1 — Предел плотности потока мощности в функции от угла прихода

2.4 Анализ помехи

В то время как характеристики наземных радиорелейных систем прямой видимости хорошо известны или могут быть достаточно хорошо спрогнозированы, конкретные формы и абсолютные уровни выведенной в общем виде диаграммы плотности потока мощности, показанной на рис. 1, должны быть подвергнуты дальнейшему исследованию. Конкретные значения пределов могут быть определены, исходя из следующих параметров:

- диапазон роста (то есть действительные максимально допустимые значения плотности потока мощности для малых и больших углов прихода: уровни F_1 и F_2 , соответственно, на рис. 1);
- скорость роста (то есть наклон линии, выраженный в дБ/градус, между значениями углов места θ_1 и θ_2 на рис. 1);
- значения углов прихода θ_1 и θ_2 ;
- последствия поддержания позиции в направлении север—юг в заданных пределах.

Метод, использованный в статистическом анализе, описан в приложении I.

2.5 Частотная зависимость пределов плотности потока мощности

При выводе пределов плотности потока мощности с ростом частоты от 4 до приблизительно 23 ГГц следует учитывать ряд факторов:

- Ожидается, что в моделях наземных систем шумовые температуры приемных систем будут расти с увеличением частоты. В силу существующих на практике ограничений ширины луча соответствующие усиления антенн вряд ли значительно выйдут за пределы максимальных величин, используемых в настоящее время на более низких частотах. Замирание, в особенности на частотах выше 10 ГГц, будет увеличиваться вследствие поглощения в дожде в течение малых процентов времени. При замирании из-за дождя можно ожидать определенной корреляции между ослаблением полезного и мешающего сигналов, в особенности если лучи направлены друг на друга. Вышеуказанные факторы создают тенденцию к увеличению допустимой плотности потока мощности. С другой стороны, радиорелейные системы могут использовать фидеры с меньшими потерями, что ведет к уменьшению допустимого предела плотности потока мощности. В конечном счете пределы плотности потока мощности в диапазоне от 10 до 15 ГГц немного выше пределов, установленных для частот ниже 10 ГГц.
- На частотах выше приблизительно 15 ГГц наземные системы будут, вероятно, использовать цифровую модуляцию. Хотя для таких систем принцип суммирования помех, справедливый для аналоговых систем с угловой модуляцией, уже неприменим, общая меньшая чувствительность цифровых систем к помехам позволяет значительно ослабить требования к максимально допустимым значениям плотности потока мощности. Далее, на этих частотах замирание имеет место главным образом вследствие ослабления в дожде, и корреляция между полезным и мешающим сигналами весьма значительна. Кроме того, существенным становится атмосферное поглощение вдоль пути распространения помехи, создаваемой космической станцией, в частности, при малых углах прихода, что включает направление друг на друга главных лучей. В приложении II показан вывод значений плотности потока мощности на частотах около 20 ГГц.

3. Пределы плотности потока мощности

На основе изложенного в предыдущих разделах считается, что вероятность неприемлемой помехи от космических станций наземным радиорелейным системам прямой видимости мала при приводимых ниже значениях пределов:

- В Статье 8 Регламента радиосвязи указаны полосы частот между 1 и примерно 23 ГГц, используемые на совместной основе фиксированной спутниковой и фиксированной службами. Для полос частот, используемых на совместной основе фиксированной спутниковой службой и наземными радиорелейными системами прямой видимости, максимальная плотность потока мощности, создаваемая на поверхности Земли излучениями любой одной космической станции, при всех условиях и всех видах модуляции не должна превышать значений, приведенных в таблице I.

ТАБЛИЦА I — Пределы плотности потока мощности ⁽¹⁾

Диапазон частот (ГГц)	Предел плотности потока мощности дБ (Вт/м ²)			
	$\theta < 5^\circ$ ⁽²⁾	$5^\circ < \theta < 25^\circ$	$25^\circ < \theta < 90^\circ$	Эталонная ширина полосы
1,7-2,5 ⁽³⁾	—154	—154 + 0,5 ($\theta-5$)	—144	} В любой полосе шириной 4 кГц В любой полосе шириной 1 МГц
2,50-2,69	—152	—152 + 0,75 ($\theta-5$)	—137	
3-8	—152	—152 + 0,5 ($\theta-5$)	—142	
8-11,7	—150	—150 + 0,5 ($\theta-5$)	—140	
11,7-15,4	—148	—148 + 0,5 ($\theta-5$)	—138	
15,4-23	—115	—115 + 0,5 ($\theta-5$)	—105	

⁽¹⁾ В соответствии с пунктами № 2581—2585 Регламента радиосвязи пределы плотности потока мощности в полосе 17,7—19,7 ГГц должны временно применяться в полосе 31,0—40,5 ГГц до тех пор, пока МККР не разработает окончательные значения, которые будут одобрены компетентной Административной конференцией (пункт 2582.1 Регламента радиосвязи).

⁽²⁾ θ : угол прихода волны (градусы над горизонтом).

⁽³⁾ В настоящее время в Регламенте радиосвязи не распределены частотные полосы в диапазоне между 1,7 и 2,5 ГГц для фиксированной спутниковой службы.

4. Помехи от космических станций, расположенных на негеостационарных орбитах

Воздействие помех от передающих космических станций, находящихся на случайно рассеянных орбитах, на наземные радиорелейные системы через главные лучи их антенн имеет переходный характер и, со статистической точки зрения, вероятно, приемлемо, поскольку орбитальное пространство не очень заполнено такими космическими станциями [Chamberlain и Medhurst, 1964].

Исследования возможных помех на частоте 4 ГГц от космических станций на 12-часовых эллиптических наклонных орбитах показали, что предел, указанный в Рекомендации 358, будет достаточен.

Результаты проведенного одной из администраций исследования одной возможной модели показали, что в используемой на совместной основе полосе около 2 ГГц потенциальные помехи от космических станций, находящихся на низких круговых орбитах, создают для радиорелейных систем с ЧРК шумы, уровни которых ниже критерия, установленного в Рекомендации 357 [Faggar, 1984 и 1985]. В отношении помех другим типам систем необходимы дальнейшие исследования.

Для других наклонных орбит с теми же предосторожностями применимы выводы, сделанные в отношении случайно расположенных орбит, поскольку в краткосрочном плане земные проекции трасс повторяются не часто. Космические станции, находящиеся на экваториальных негеостационарных орбитах, могут в силу их сравнительно систематического движения создавать чрезмерные помехи наземным радиорелейным системам из-за многочисленных воздействий через главные лепестки. Следует отметить, что при выборе местоположений радиорелейных станций спутники, находящиеся на таких орбитах, не учитываются и любые требования ввести такой учет привели бы к неприемлемым ограничениям.

5. Влияние пределов плотности потока мощности на работу космических систем

Ниже приводится краткая оценка пригодности излучений космической станции, отвечающих нижним пределам, указанным в пункте 3.

Приняты следующие характеристики, типичные для относительно простых земных приемных станций:

ТАБЛИЦА II

Полоса частот (ГГц)	Диаметр антенны (м)	Усиление антенны (дБ)	Шумовая температура приемной системы (К)
4	7,5	47	500
12	6,0	55	700
20	4,5	57	1000

Предположив наличие условий распространения в свободном пространстве и максимальной допустимой плотности потока мощности для малых углов места, плотность принимаемой мощности на входе приемника земной станции можно сравнить с плотностью мощности теплового шума в той же точке. Допустив далее, что имеет место угловая модуляция с большой девиацией или цифровая модуляция (форма спектра: гауссова или поднятый косинус, соответственно), необходимо из отношения спектральных плотностей сигнала и шума вычесть примерно 4 дБ, получив в остатке доступное неухудшенное отношение сигнал/шум.

ТАБЛИЦА III

Полоса частот (ГГц)	Спектральная плотность сигнала	Спектральная плотность шума	Отношение сигнал/шум (дБ)
4	—137,5 дБ (Вт/4 кГц)	—165,5 дБ (Вт/4 кГц)	24
12	—137,0 дБ (Вт/4 кГц)	—164,0 дБ (Вт/4 кГц)	23
20	—104,5 дБ (Вт/МГц)	—138,5 дБ (Вт/МГц)	30

На частотах ниже примерно 15 ГГц, где применяется угловая модуляция с большой девиацией, результирующий запас по мощности представляется вполне достаточным. В системах, использующих цифровую модуляцию на частотах выше 15 ГГц, вышеприведенные отношения сигнал/шум применимы только на пределе при предполагаемых параметрах систем.

Иногда могут быть желательны более высокие значения отношения сигнал/шум. В этих случаях более высокие пределы плотности потока мощности при больших углах прихода антенн космических станций имеют существенное значение в связи с узкими лучами (см. приложение III).

6. Влияние пределов плотности потока мощности на проектирование цифровых радиорелейных систем

Помехи от космических станций на частотах ниже 10 ГГц приводят к небольшому ухудшению характеристик уже из-за одного только теплового шума. Поскольку допустимые пределы плотности потока мощности были установлены на основе аналоговых систем, а допустимое ухудшение характеристик — в соответствии с Рекомендацией 615, можно ожидать появления некоторых ограничительных условий для проектирования цифровых радиорелейных линий. В приложении IV исследуется вопрос о том, как может влиять исключение направления антенн на орбиту. Дальнейшее рассмотрение применения существующих пределов ППМ для цифровых радиорелейных систем представлено в приложении V.

7. Дополнительные замечания

Предыдущие рассуждения частично основаны на допустимых помехах, принятых в Рекомендации 357, исходя из предположения, что эти допустимые помехи полностью вызваны передающими космическими станциями и что действительное число антенн наземных станций, направленных в сторону геостационарной орбиты, невелико и находится в достаточном соответствии со статистическими моделями.

Если бы было решено использовать в спутниковых системах частотные присвоения для связей в направлении Земля — космос и космос — Земля на факультативно взаимозаменяемой основе, то часть допустимой помехи по Рекомендации 357 должна была бы быть распределена к помехам от земных станций, что привело бы к соответствующему уменьшению допустимой плотности потока мощности от космических станций.

Кроме того, исследования, на которые делается ссылка в § 2.3, были выполнены при допущении, что форма характеристик излучения антенны соответствует приведенной в Отчете 614. Эти характеристики присущи круглым раскрывам, обладающим полной симметрией. Однако некоторые типы антенн наземных радиорелейных станций не обладают круговыми симметричными характеристиками излучения, и их характеристики можно считать аналогичными характеристикам, приведенным в Отчете 614, только в горизонтальной плоскости. Поскольку помехи от космических станций принимаются во всех плоскостях, возникает необходимость в дополнительных исследованиях. Такие исследования были недавно проведены [Butzien, 1981] и дали полную характеристику во всех трех измерениях для пирамидального рупорного рефлектора. Полученные выводы были аналогичны выводам предыдущих исследований [May и Pagones, 1971]. Характерно, что пределы, приведенные в § 3, адекватно защищают радиорелейные системы, однако для небольшого процента чувствительных систем допустимый уровень помех может быть превышен.

Следует отметить, что если основные лучи наземных антенн не наводятся на геостационарную орбиту в пределах дуги 1° , то потенциал помех от космических станций может быть значительно снижен.

ССЫЛКИ

- BUTZIEN, P. E. [January 1981] Radio system interference from geostationary satellites. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-29, 1, 33—40.
- CHAMBERLAIN, J. K. and MEDHURST, R. G. [March, 1964] Mutual interference between communication satellites and terrestrial line-of-sight radio-relay systems. *Proc. IEE*, Vol. 111, 3, 524—534.
- CHEILIK, P. [1983] Model for determining the interference effects on terrestrial microwave systems by communications satellites in geostationary orbit, IEEE Globecom.
- FARRAR, A. [1984] Assessment of satellite power flux-density limits in the 2025—2300 MHz frequency range. NTIA Report 84-152. National Telecommunications and Information Administration, US Dept. of Commerce, Office of Telecommunications, Institute for Telecommunication Sciences, Boulder, CO.
- FARRAR, A. [1985] Computer models for determination of satellite power flux-density limits. Electromagnetic Compatibility Symposium, Symposium Digest, Zurich, Switzerland.
- MAY, A. S. and PAGONES, M. J. [January, 1971] Model for computation of interference to radio-relay systems from geostationary satellites, *BSTJ*, Vol. 50, 1, 81—102.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА МОЩНОСТИ
В ПОЛОСЕ ЧАСТОТ МЕЖДУ 1 И 10 ГГц.

1. Введение

Для исследования влияния различных пределов плотности потока мощности на возможность совместного использования частот передающими космическими станциями на геостационарной спутниковой орбите и наземными радиорелейными системами прямой видимости многие администрации применили статистический подход.

2. Метод оценки

Расчеты сделаны в предположении хаотически расположенных радиорелейных систем протяженностью, равной гипотетической эталонной цепи МККР. Средняя широта расположения системы и в некоторых случаях средний азимут конечных точек системы изменялись, и делались допущения по определенным распределениям угла места и азимута основных лучей антенны наземной станции относительно среднего значения азимута системы.

При допущении различных пределов плотности потока мощности были проведены расчеты суммарной помехи, причиняемой моделям наземных систем спутниками, расположенными через каждые 3° и каждые 6°, при различных пределах удержания спутника от дрейфа в направлении север—юг, и создающими во всех случаях полные допущенные в расчетах плотности потока мощности при всех углах прихода.

Абсолютные значения плотности потока мощности были выбраны так, чтобы:

- могло быть приемлемым разумное увеличение плотности потока мощности при больших углах прихода;
- для негеостационарных и геостационарных космических станций могли быть использованы одни и те же пределы плотности потока мощности;
- максимальная допустимая мощность помехи, указанная в Рекомендации 357, превышалась только в сравнительно небольшой части (≈10%) “высокочувствительных” наземных систем и в несколько меньшем проценте “среднечувствительных” систем.

3. Модель систем

Репрезентативные технические характеристики радиорелейных систем, в отношении которых был проведен анализ, показаны в таблице IV, ниже.

ТАБЛИЦА IV — Предполагаемые параметры модели радиорелейных систем

Частота	2,5 ГГц	4 ГГц	4 ГГц
Тип системы	Высокочувствительная	Среднечувствительная	Высокочувствительная
Длина участка (км)	60	50	50
Усиление антенны (дБ)	38	40	42
Потери в фидере (дБ)	3	3	3
Шумовая температура приемной системы (К)	750	1 750	750
Мощность теплового шума в канале на одном участке (пВт _{0псф})	25	25	10 и 25

Были приняты следующие характеристики излучения общего вида для антенн наземной станции:

$$G(\varphi) = G_1 - 25 \log \varphi \quad \text{дБ, для } \varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1, \quad (1)$$

$$= G_2 \quad \text{дБ, для } \varphi_1 < \varphi \leq 180^\circ,$$

где φ — угол в градусах, отсчитываемый от оси основного луча.

4. Результаты расчетов

Расчеты показывают, что пределы плотности потока мощности, приведенные в § 3 настоящего Отчета, адекватно защищают модель радиорелейных систем средней чувствительности, но в некоторых случаях вызывают превышение допустимых величин, указанных в Рекомендации 357, в модели высокой чувствительности.

Расчеты также показывают, что спутники на наклонных орбитах оказывают минимальное влияние на уровень суммарной помехи системам ФС как функцию точности удержания спутника от дрейфа в направлении север—юг. Однако нужно заметить, что, хотя примененный здесь для изучения влияния помех системам ФС от систем ФСС статистический метод подходит для систем ФСС со спутниками на экваториальных орбитах, может потребоваться дальнейшее рассмотрение элементов, чувствительных во времени, чтобы определить неготовность систем ФС, когда спутники ФСС движутся по наклонным орбитам.

5. Влияние изменений во времени уровней полезного и мешающего сигналов

Изменения во времени, которым могут быть подвержены как полезные, так и мешающие сигналы, были учтены в определенной степени. Например, расчеты в предположении замирания Рэлея, имеющего место в течение $\frac{1}{3}$ месяца, показывают, что пределы плотности потока мощности для диапазона частот от 3 до 8 ГГц, данные в таблице I настоящего Отчета, вызовут мощность шума 50 000 пВт_{псф} в телефонном канале модели радиорелейной системы, работающей на частоте 4 ГГц, в течение примерно от 0,003 до 0,02% времени в зависимости от широты расположения системы. Было принято, что в модели радиорелейной системы имеется защита с переключением разнесения (1:1) через каждые пять участков, а модель спутниковой системы имеет спутники, разнесенные на 3°, причем каждый спутник создает допустимую плотность потока мощности при всех углах прихода.

Представляется желательным проведение более детального изучения всех этих влияний.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ОГРАНИЧЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА МОЩНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ, СОЗДАВАЕМОЙ СПУТНИКАМИ СВЯЗИ, РАБОТАЮЩИМИ НА ЧАСТОТЕ ОКОЛО 20 ГГц

В настоящем приложении рассматривается в качестве примера модель помехи, с помощью которой определяются пределы плотности потока мощности для малых и больших углов места. Предполагается, что та же зависимость от угла прихода применима и на более низких частотах.

1. Характеристики модели

В качестве основы для расчетов принята модель цифровой линии с 4-позиционной ФМ со следующими параметрами:

- мощность передатчика 50 мВт (−13 дБВт);
- потери в передающем фидере 4 дБ;
- диаметр антенны 1 м (усиление около 43,5 дБ, эффективная площадь 0,4 м²);
- потери в свободном пространстве 138 дБ (10 км);
- ширина полосы 400 МГц;
- коэффициент шума приемника 5 дБ.

Для этой модели стандартная принимаемая мощность составляет −68 дБВт, а уровень теплового шума −112,8 дБВт.

Кроме того, были сделаны следующие предположения:

- разнос спутников — 3°; это означает, что на горизонте или над ним может находиться около 50 спутников;
- атмосферное поглощение помехи, находящейся в пределах луча, равное 3 дБ, может превышать в течение более чем 80% времени любого месяца;
- среднее усиление боковых лепестков антенны для сигналов, приходящих вне луча, составляет −3 дБ;
- средняя плотность потока мощности от 50 спутников на 3 дБ ниже допустимого значения.

2. Пределы плотности потока мощности

Прежде всего рассмотрим случай помехи, приходящей в пределах луча, поскольку им определяется приемлемая плотность потока мощности при малых углах места. При ослаблении полезного сигнала радиорелейной системы в условиях сильного дождя мешающий сигнал от спутников также ослаблен и, поскольку путь его распространения через атмосферу длиннее, его ослабление, как правило, больше, чем ослабление полезного сигнала. Поэтому при нормальных условиях распространения и в предположении, что отношение полезного сигнала к мешающему должно быть по крайней мере 30 дБ, максимально допустимое значение помехи составляет:

$$-68 -30 = -98 \text{ дБВт в полосе } 400 \text{ МГц.}$$

Учитывая значение эффективной площади антенны, потери в приемном фидере и приведя ширину полосы к 1 МГц, находим, что максимальное значение плотности потока мощности помехи в пределах луча в условиях распространения в свободном пространстве составляет $-115 \text{ дБ (Вт/м}^2\text{)}$ в любой полосе шириной 1 МГц.

Далее рассмотрим случай помехи вне пределов луча. Допустимая плотность потока мощности при больших значениях угла места определяется суммой помех. В этом случае норма для условий с дождем более строгая, чем для нормальных условий, и расчеты для этих условий достаточны. В предположении, что допустимая плотность потока мощности будет на 10 дБ ниже уровня теплового шума, максимальная допустимая плотность потока мощности составляет $-110,3 \text{ дБ (Вт/м}^2\text{)}$ в любой полосе шириной 1 МГц.

Как указывалось выше, этот предел является нормой для случая, когда полезный сигнал ослабляется из-за дождя более чем на 30 дБ при предполагаемом дополнительном ослаблении мешающего сигнала на 6 дБ. В соответствии с этим допустимое значение плотности потока мощности будет $-104,3 \text{ дБ (Вт/м}^2\text{)}$ в любой полосе шириной 1 МГц.

ПРИЛОЖЕНИЕ III

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НА ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКАХ АНТЕНН С "ИГЛООБРАЗНЫМ ЛУЧОМ"

Для получения выигрыша от повышенной плотности потока мощности, допускаемой при больших углах места, спутник должен быть оборудован ориентированной на Землю антенной с узким лучом. При узких лучах, направленных в сторону от подспутниковой точки (то есть близко к горизонту), необходимы специальные меры предосторожности для того, чтобы излучение от спутника удовлетворяло пределу плотности мощности при всех углах места.

В основном эти меры сводятся к облучению поверхности Земли меньшим потоком мощности по сравнению с соответствующим допустимым пределом в центре луча, чтобы значения плотности потока мощности удовлетворяли пределам для излучений, приходящих при всех углах места.

На рис. 2 показано соотношение между углом наклона α на спутнике (определяемым как угол между геоцентрическим радиусом — вектором и лучом, направленным в точку на поверхности Земли) и соответствующим углом прихода над горизонтом излучения от спутника. На рис. 3 представлены репрезентативные диаграммы основного луча спутниковых антенн. Показаны три значения ширины луча:

ТАБЛИЦА V

Ширина луча на уровне 3 дБ (в градусах)	Диаметр антенны, работающей на частоте 4 ГГц (м)
2	2,6
1	5,2
0,5	10,4

Диаграммы основного луча имеют общую форму:

$$10 \log (G/G_0) = -12 (\varphi/\varphi_0)^2 \quad \text{дБ,} \quad (2)$$

где φ — угол, отсчитываемый от оси основного луча, а φ_0 — ширина луча на уровне половинной мощности.

Сплошная кривая на рис. 4 показывает максимальную плотность потока мощности в центре луча, удовлетворяющую пределам плотности потока мощности, показанным на всех углах места. Спутниковая антенна с шириной луча $0,5^\circ$ на половинном уровне мощности может точно следовать за быстрыми изменениями этого предела плотности потока мощности на малых углах прихода при приближении к горизонту. Более широкие лучи со спутника, направленные близко к горизонту, ограничены кривой плотности потока у горизонта.

На рис. 4 представлены также местоположения центров лучей спутниковой антенны при различной ширине лучей. Отметим, что для луча данной ширины плотность потока мощности в центре луча должна быть ограничена, как показано, этими кривыми таким образом, чтобы ни одна из частей луча антенны не выходила за пределы сплошной линии.

Эти кривые показывают, что проектировщики спутниковой системы могут оказаться не в состоянии извлечь полностью все преимущества более высоких значений плотности потока для каждого спутника при каждом угле прихода.

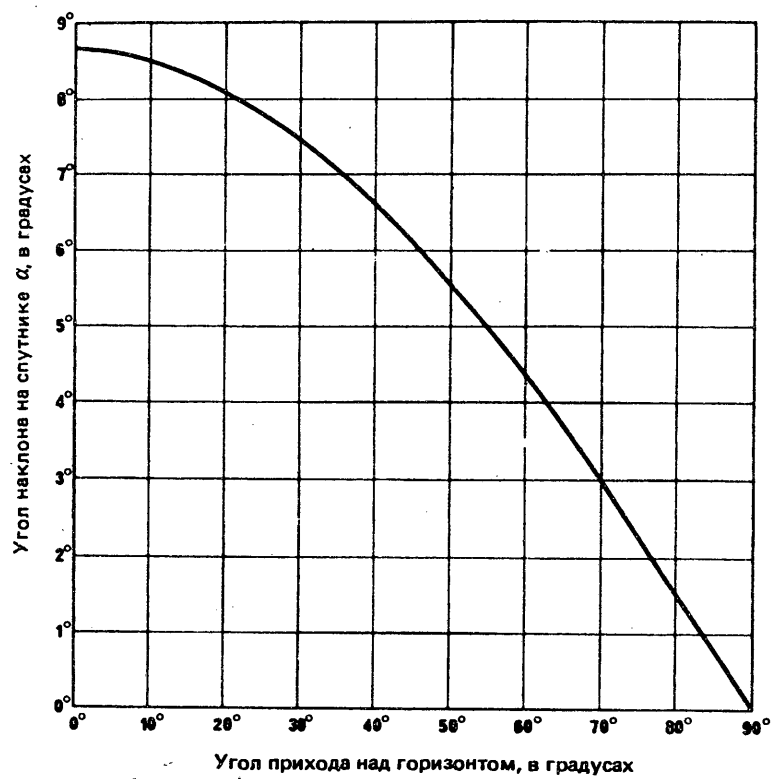


РИСУНОК 2 — Угол наклона на спутнике α в функции от угла прихода над горизонтом

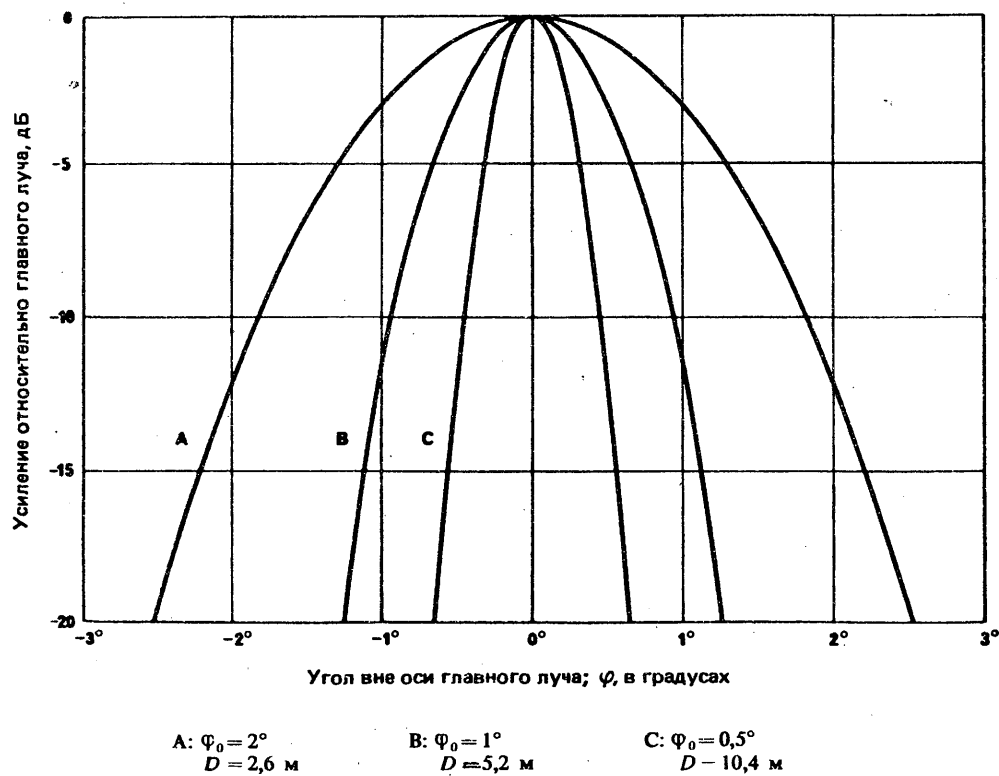


РИСУНОК 3 — Репрезентативные диаграммы главного луча спутниковой антенны

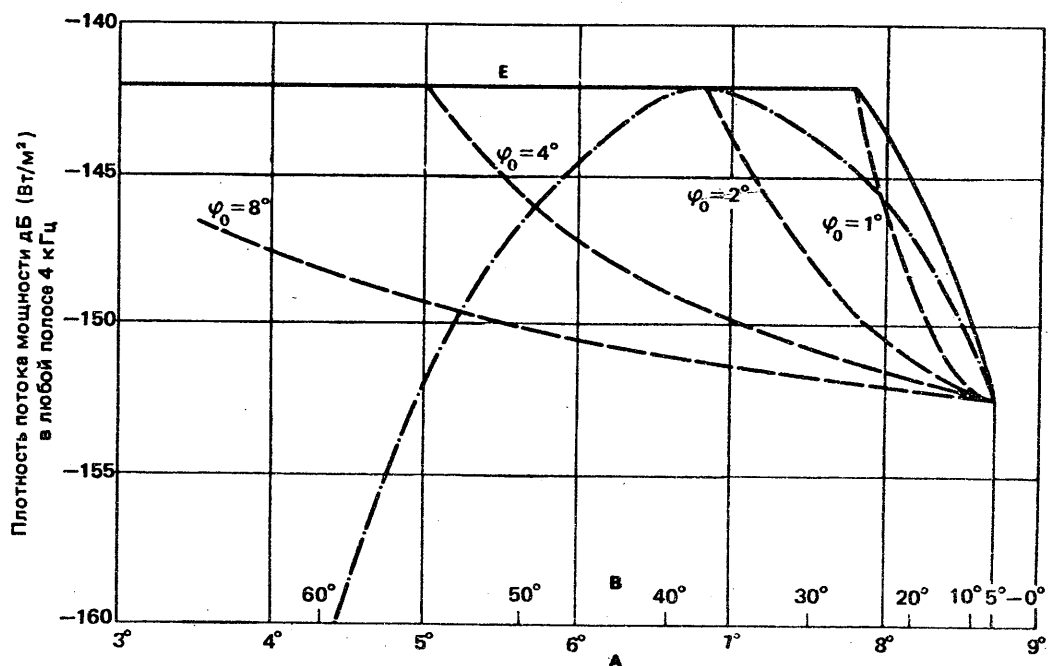


РИСУНОК 4 — Максимальная плотность мощности в центре луча без превышения кривой Е

- Местоположения центров лучей спутниковой антенны для разных значений ширины луча в случае, когда достигается предел Е
- - - - - Пример луча шириной 2°, подходящего для условий ограничения кривой Е
- Е: Предел плотности потока мощности в полосе от 3 до 8 ГГц
- А: Шкала для углов наклона на спутнике (в градусах)
- В: Шкала для углов прихода над горизонтом (в градусах)

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

ПРИМЕНЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ НАПРАВЛЕНИЯ НА ОРБИТУ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЦИФРОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ ИЗ-ЗА ПРЕДЕЛОВ, УКАЗАННЫХ В РЕКОМЕНДАЦИИ 358

1. Введение

В Рекомендации 615 допускается ухудшение на 10% характеристик качества гипотетического эталонного цифрового тракта (ГЭЦТ) цифровой радиорелейной системы из-за помех от систем фиксированной спутниковой службы (ФСС). В то же время в Статье 27 Регламента радиосвязи и в Рекомендации 358 определяются допустимые значения плотности потока мощности, создаваемые космическими станциями ФСС в различных полосах частот.

В настоящем приложении изучается влияние необходимости ограничений направления на орбиту антенны приемников радиорелейных линий, работающих совместно с ФСС в полосах частот ниже 15 ГГц. В нем излагается подход к определению ограничений направления на орбиту при проектировании цифровых радиорелейных систем.

2. Модель цифровой радиорелейной системы

Для целей настоящего анализа были выбраны следующие типичные параметры, основанные на цифровых радиорелейных системах Канады:

- полоса частот: 4 ГГц;
- ширина полосы: 20 МГц;
- антенна: параболическая, диаметр 4 м,
усиление: 42 дБи,
диаграмма направленности: $35 - 25 \log X$ дБи при $1,8 \leq X < 25$,
0 дБи при $X \geq 25$
(где X = угол, отсчитываемый от оси луча);
- широта: 50° с. ш.

Для определения общего ухудшения характеристик, вызываемого постоянным потоком помехи от космических станций, необходимо рассчитать мощность помехи, принимаемой каждой приемной станцией. Это определяется с помощью вышеприведенных параметров и угла, под которым приемная антенна отклонена от орбиты.

Считается, что станции при очень малой потере общности можно классифицировать следующим образом:

- Категория А: радиорелейные станции с малым отклонением от орбиты, то есть от 2° до 10° ;
- Категория В: радиорелейные станции с большим отклонением от орбиты, то есть больше 10° .

Примем в качестве характерной для категории А станцию, антенна которой ориентирована в направлении 2° от орбиты, а для категории В — станцию, антенна которой ориентирована в направлении 10° от орбиты. Для достижения более высокой точности возможно большее число категорий при меньших углах отклонения. Однако для иллюстрации принципа достаточно вышеприведенного деления.

Пусть доля станций категории А в ГЭЦТ будет Q , а доля станций категории В — $(1 - Q)$. Тогда оказывается возможным, как следует из пунктов, ниже, определить общее ухудшение характеристик ГЭЦТ и отнести его к рекомендованному значению (Рекомендация 615), получив таким образом значение Q .

3. Мощность принимаемой помехи

Используя геометрические соотношения, приведенные в работе [May и Pagonis, 1971], при предположении, что орбитальный разнос спутников составляет 3° и удовлетворяются нормы по плотности потока мощности, приведенные в Статье 27, находим, что мощность суммарной помехи для станции категории А составляет:

$$Pr_A/4 \text{ кГц} = -158,1 \text{ дБ (Вт/4 кГц)}.$$

Предположив, что мешающий сигнал от спутника представляет собой несущую телевизионного сигнала с рассеянием энергии в полосе 2 МГц, определим суммарную мощность помехи в полосе пропускания приемника шириной 20 МГц:

$$Pr_A = -131,1 \text{ дБ (Вт/20 МГц)}.$$

Станции категории В имеют избирательность антенны по крайней мере $25 \log 10/2 = 17,5$ дБ, откуда максимальное суммарное значение принимаемой мощности равняется:

$$Pr_B = -175,6 \text{ дБ (Вт/4 кГц)} \text{ или } -148,6 \text{ дБ (Вт/20 МГц)}.$$

4. Ухудшение характеристик, вызываемое помехой

Примем, что помеха от космической станции имеет устойчивое значение, которое не увеличивается из-за многолучевости. Результатом этого будет снижение запаса на замирание в подверженной помехе радиорелейной линии и, следовательно, ухудшение ее характеристик. Мощность теплового шума типичного приемника ($T = 750$ К; см. Отчет 382) составляет:

$$N_0 = -126,8 \text{ дБ(Вт/20 МГц)}.$$

При допущении, что помеха имеет характер шума (см. Отчет 877), ухудшение характеристики для данного отношения помехи к тепловому шуму I/N_0 может быть выражено коэффициентом x_p , определяемым выражением:

$$x_p = 1 + 10^{(I/N_0)/10}. \quad (3)$$

Для станции категории А отношение I/N_0 составляет $-4,26$ дБ, а для станции категории В $-21,8$ дБ. Из уравнения (3) находим, что для станций категории А $x_p = 1,38$, а для станций категории В $x_p = 1,007$.

Принимая, что число станций в радиорелейной системе равняется n и что 10% от общего ухудшения вызывается помехой от спутников, получаем, что ухудшение только из-за теплового шума на каждой станции будет выражаться как:

$$P_{0\tau} = \frac{0,9 P_0}{n},$$

где

P_0 — суммарное допустимое ухудшение в процентах времени (см. Рекомендацию 594).

Тогда для nQ приемников категории А и $(1-Q)n$ приемников категории В суммарное ухудшение P_0 равняется:

$$\begin{aligned} P_0 &= P_{0\tau} \times 1,38 \times nQ + P_{0\tau} \times 1,007 \times (1-Q)n \\ &= 0,9 P_0 (0,38 Q + 1,007), \end{aligned}$$

откуда $Q = 27\%$.

5. Обсуждение результатов

Вышеприведенный консервативный анализ показывает, что примерно 27% антенн наземных приемников в ГЭЦТ могут быть направлены в пределах от 2 до 10° от геостационарной орбиты, если антенны остальных станций направлены более чем на 10° в сторону. Страны с доминирующим направлением трасс восток-запад должны учитывать это обстоятельство.

Следует отметить, что в вышеприведенном анализе принята необходимая ширина рассеивания энергии составляет 2 МГц. Возможно, что будущие системы потребуют больших значений э.и.и.м. и, как следствие, более широкой полосы рассеивания энергии, например 4 МГц. В результате помеха увеличится на 3 дБ, а показатель 27% изменится на 13%.

6. Заключение

В этом приложении показано, как следует учитывать при проектировании цифровых радиорелейных систем содержащийся в Рекомендации 615 допуск 10% на помехи от ФСС. Из него следует, что при этом допуске до 27% антенн станций данной радиорелейной системы могут быть направлены в пределах от 2 до 10° от геостационарной орбиты. В действительности при консервативных предположениях, сделанных в вышеприведенной классификации, это процентное отношение может быть еще увеличено в большинстве встречающихся на практике систем. Даже в предположении более высоких значений э.и.и.м. в будущем ограничения сохраняют свою обоснованность.

ССЫЛКИ

MAY, A. S. and PAGONES, M. J. [January, 1971] Model for computation of interference to radio-relay systems from geostationary satellites. *BSTJ*, Vol. 50, 1, 81-102.

ПРИЛОЖЕНИЕ V

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА МОЩНОСТИ,
ИЗЛУЧАЕМОГО ГЕОСТАЦИОНАРНЫМИ СПУТНИКАМИ, В ОТНОШЕНИИ НОРМЫ
КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ

1. Основные формулы

При расчете допустимых значений плотности потока мощности был использован метод, данный в [Мау и Рогонес, 1971] для определения геометрических соотношений, связывающих космические станции и наземные радиорелейные станции. Предполагается, что спутники равномерно распределены по всей геостационарной орбите с разносом 3° . Предполагается также, что уровень излучения боковых лепестков антенны радиорелейной станции определяется в соответствии с Отчетом 614-2 и представляется следующим образом:

$$G(\beta) = 10 \log g(\beta) = \begin{cases} 35 - 25 \log \beta, \text{ дБ} & \text{при } 2^\circ \leq \beta \leq 25^\circ, \\ 0 \text{ дБ} & \text{при } \beta > 25^\circ, \end{cases} \quad (1)$$

где β — угол между направлением оси основного лепестка диаграммы направленности приемной антенны и направлением на спутник.

Если по радиорелейной системе передаются аналоговые сигналы, то значение мощности мешающего сигнала, создаваемого N спутниками, видимыми со станции, будет равно:

$$P_{is} = \sum_{j=1}^N f(\theta_j) S_E(\beta_j) \frac{B}{\Delta F b_p}, \quad (2)$$

где $f(\theta_j) = 10^{0,1 F(\theta_j)}$, $F(\theta_j)$ — допустимое значение плотности потока мощности, определяемое в соответствии с Рекомендацией 358-3 и Статьей 28 Регламента радиосвязи;

$S_E(\beta_j)$ — эффективное значение площади антенны наземной радиорелейной станции для приходящего излучения;

B — ширина полосы приемника радиорелейной станции;

b_p — коэффициент, учитывающий разную поляризацию полезного и мешающего сигналов;

$\Delta F = 4$ кГц — ширина полосы, в которой определяется значение допустимой плотности потока мощности.

$$S_E(\beta_i) = \frac{\lambda^2}{4\pi} g(\beta_i),$$

где λ — длина волны сигнала.

Если по радиорелейной системе передаются цифровые сигналы, то значение допустимой мощности мешающего сигнала P'_{is} на входе приемника наземной радиорелейной станции будет определяться подобно (2):

$$P'_{is} = \sum_{j=1}^N f'(\theta_j) S_E(\beta_j) \frac{B}{\Delta F b_p}, \quad (3)$$

где $f'(\theta_j) = 10^{F'(\theta_j)/10}$, $F'(\theta_j)$ — допустимое значение плотности потока мощности для цифровой радиорелейной станции.

Поскольку суммарная мощность мешающего сигнала P_{is} определяется плотностью потока мощности $f(\theta)$, а P'_{is} определяется $f'(\theta)$, можно написать:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P'_{is}}{P_{is}} &= \frac{f'(\theta)}{f(\theta)}; \\ f'(\theta) &= f(\theta) \frac{P'_{is}}{P_{is}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Согласно Рекомендации 594, коэффициент ошибок на выходе гипотетического эталонного цифрового тракта протяженностью 2500 км радиорелейной системы не должен превышать 10^{-3} в течение более чем $T_{\Sigma} = 0,054\%$ времени. Согласно Рекомендации 615, излучения космических станций фиксированной спутниковой службы не должны вызывать в том же ГЭЦТ увеличения значения 10^{-3} коэффициента ошибок в течение более чем $T_M = 0,0054\%$ времени любого месяца.

На основе вышеизложенного можно считать, что

$$T_{\Sigma} = T_T + T_M, \quad (5)$$

где T_T — процент времени, в течение которого значение коэффициента ошибок может превышать 10^{-3} из-за тепловых и других видов шумов, возникающих в цифровой радиорелейной системе при отсутствии мешающих сигналов.

Из (5) и упомянутых выше Рекомендаций следует, что $T_T = 0,0486\%$ времени наблюдения.

Поскольку в спутниковых системах связи, использующих сигналы дисперсии, спектральная плотность мощности почти равномерна, можно написать:

$$A_{in} = \frac{P_S V_{\min}^2(T_{\Sigma i})}{P_T + P'_{is}}, \quad (6)$$

где P_S — мощность сигнала на входе приемника наземной станции;
 $V_{\min}^2(T_{\Sigma i})$ — минимальное допустимое значение множителя ослабления сигнала, соответствующее $T_{\Sigma i} \%$ времени;
 P_T — мощность теплового шума;
 P'_{is} — мощность мешающего сигнала, определяемая в соответствии с формулой (3), и

$$P_T = k T_E B, \quad (7)$$

где k — постоянная Больцмана;

T_E — эквивалентная температура шума приемника.

При отсутствии мешающих излучений спутников формула (6) принимает вид:

$$A_{in} = \frac{P_S V_{\min}^2(T_{Ti})}{P_T}, \quad (8)$$

где $V_{\min}^2(T_{Ti})$ — минимальное допустимое значение множителя ослабления сигнала, соответствующее $T_{Ti} \%$ времени.

Из (6) и (8) получим:

$$P'_{is} = P_T \left(\frac{V_{\min}^2 (T_{\Sigma i})}{V_{\min}^2 (T_{Ti})} - 1 \right), \quad (9)$$

Теперь используем формулу из Отчета 338-5, чтобы определить ожидаемое значение процента времени, в течение которого множитель ослабления сигнала может быть меньше $V_{\min}$:

$$T(V_{\min}) = K Q f^B R^C V_{\min}^2, \quad (10)$$

где K — коэффициент, учитывающий климатические условия;

Q — коэффициент, учитывающий характер трассы;

f — частота сигнала в ГГц;

R — длина пролета в км.

Выразив на основе (10) значения $V_{\min}^2$, соответствующие процентам времени $T_{\Sigma i}$ и T_{Ti} , и подставив их в (9), получаем:

$$P'_{is} = P_T \left(\frac{T_{\Sigma i}}{T_{Ti}} - 1 \right) = P_T \left(\frac{T_{is}}{T_{Ti}} \right). \quad (11)$$

Отсюда, предполагая, что все пролеты радиорелейной линии идентичны, и учитывая (4) и (7), получаем:

$$f'(\theta) = f(\theta) + 10 \lg \left[\frac{0,11 m k T_E \Delta F b_p}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N f(\theta_j) g(\beta_j) \frac{\lambda^2}{4\pi}} \right],$$

где m — число пролетов наземных радиорелейных линий.

2. Результаты расчета

Согласно приложению IV к Отчету 387-5, на широте 50° и на частоте 4 ГГц до 27% общего числа радиорелейных станций могут иметь антенны, направленные на 2° и более от геостационарной орбиты, а остальные наземные станции могут облучаться спутниками под углами $\beta \geq 10^\circ$.

Принимая $F(\theta) = -152$ дБВт/м², $m = 50$, $T_E = 750$ К, $\Delta F = 4$ кГц, $b_p = 2$ и используя график, приведенный в [Бадалов К. А., 1989], показывающий $\sum_{j=1}^N f(\theta_j) g(\beta_j)$ как функцию угла β для положения радиорелейной системы на широте 50° (рис. 1), получаем $F'(\theta) = -164$ дБВт/м².

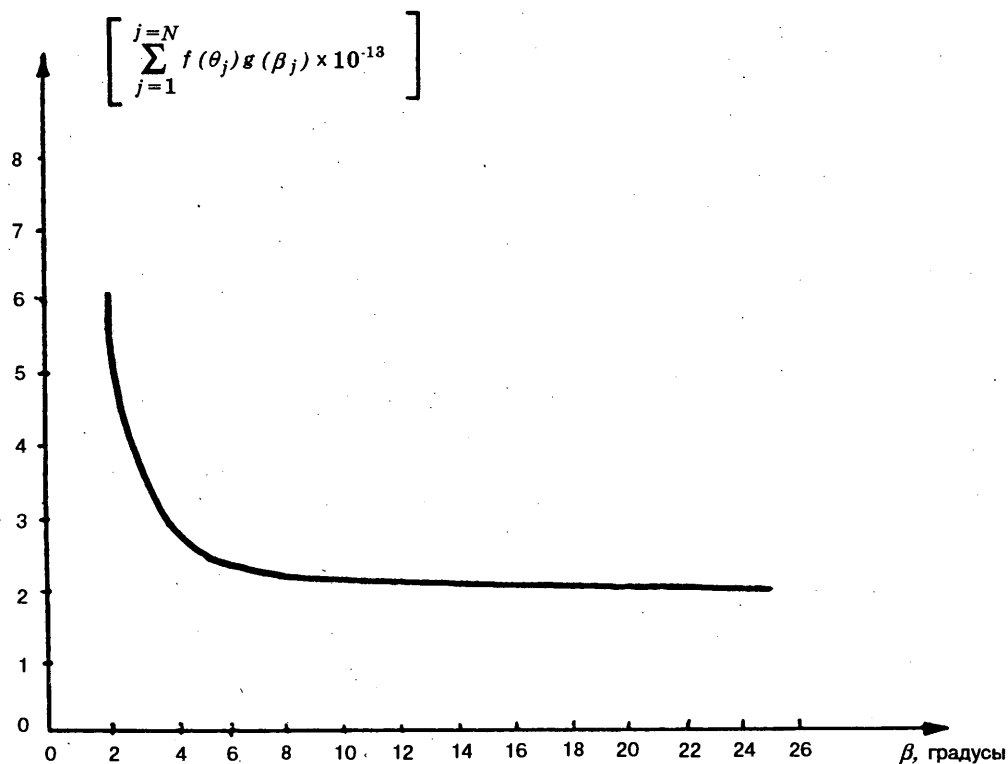


РИСУНОК 1

3. Выводы

Вышеприведенный анализ показывает, что при данных условиях, используемых в модели, принятой [May и Ragones, 1971], и при применении цифровых методов передачи в наземных радиорелейных системах помеха от спутников фиксированной спутниковой службы может превышать значения, рекомендованные МККР (Рекомендации 594 и 615) для малых процентов времени.

Подобные же выводы были сделаны в [Бородич С.В., 1986; Калашников Н.И., Бадалов К.А., 1989].

Однако, поскольку рассмотренная модель размещения спутников и радиорелейных станций исключительно консервативна и не может отражать реальной ситуации, необходимо провести дальнейшие исследования на основе реальных моделей с целью получения более точных значений допустимой плотности потока мощности.

ССЫЛКИ

БОРОДИЧ С. В. [1986] Критерии и условия ЭМС систем спутниковой и радиорелейной связи. *Электросвязь*, 2, 28—31.

КАЛАШНИКОВ Н. И., БАДАЛОВ К. А. [1989] Воздействие мешающих сигналов с геостационарных ИСЗ на наземные цифровые РРЛ. *Радиотехника*, 7.

БАДАЛОВ К. А. [1989] Допустимые значения плотности потока мощности, создаваемой геостационарными ИСЗ. *Электросвязь*, 4.

ОТЧЕТ 1005

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОС ЧАСТОТ СИСТЕМАМИ ФИКСИРОВАННОЙ СЛУЖБЫ И СИСТЕМАМИ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ, СОДЕРЖАЩИМИ СЕТИ, РАБОТАЮЩИЕ В ПОЛОСАХ ЧАСТОТ, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДЛЯ ОСНОВНОГО НАПРАВЛЕНИЯ (ОН) И РЕВЕРСНОГО НАПРАВЛЕНИЯ (РН) ПЕРЕДАЧ

(Исследовательская программа 17F/9)

(1986)

1. Введение

В Отчете 557 описываются трудности, возникающие при совместном использовании полос частот системами фиксированной службы и фиксированной спутниковой службы, если предпринимается попытка работать в реверсном направлении (РН), без каких-либо ограничений в полосах частот, распределенных для двустороннего использования, где системы фиксированной спутниковой службы уже интенсивно работают в основном направлении (ОН) в международных сетях. В данном Отчете изучается возможность уменьшения трудностей совместного использования полос частот, обсуждаемых в Отчете 557, что позволит, таким образом, создавать национальные и субрегиональные спутниковые сети, основанные на работе в РН. Один из подходов состоит в том, чтобы ограничить работу в РН только случаями использования узких лучей для обслуживания земных станций, работающих в РН с углами места не меньше, чем, скажем, 40° на краю зоны покрытия.

2. Общие замечания по работе в РН

Вопрос о практической осуществимости двусторонней работы в полосах частот, используемых совместно с наземными радиорелейными линиями, путем добавления спутниковых сетей, работающих в РН, к спутниковым сетям, работающим в ОН, так, что передачи на линиях спутник — Земля и Земля — спутник осуществляются на одних и тех же частотах, поставлен в Отчете 557.

В разделе 6 Отчета 557 делается вывод о том, что ограничения на плотность потока мощности и э.и.м. как для спутниковых, так и наземных фиксированных служб должны быть ужесточены, с тем чтобы качество каждой из служб не ухудшилось в результате добавления работы в РН.

Однако центральным при этом является предположение о применении глобальных, или узких, лучей, нацеленных близко к краю Земли, для обеспечения работы земных станций с углами места порядка 5° . Таким образом, применяется усиление спутниковой антенны в направлении края Земли, превышающее 18 дБ относительно изотропного уровня.

Внедрение ограничений на работу в РН для облегчения условий совмещения рассматривается в следующем разделе, причем особое внимание уделяется работе в РН с использованием узких лучей для обслуживания земных станций с большими углами места ($> 40^\circ$).

3. Работа в РН с использованием узких лучей для обслуживания земных станций с большими углами места ($> 40^\circ$)

3.1 Общие положения

Быстро нарастающая потребность в увеличении числа национальных или субрегиональных спутниковых систем подкрепляет необходимость рассмотрения вопроса о возможности внедрения работы в РН таким образом, чтобы максимально уменьшить ограничения, налагаемые как на спутниковые сети, работающие в ОН, так и на наземные радиорелейные системы.

Геометрические соотношения показывают, что если бы сети, работающие в РН, использовали узкие лучи шириной, скажем, 2° в основном для обслуживания земных станций с большими углами места, превышающими примерно 40° , то многие страны могли бы обслуживаться без усиления боковых лепестков спутниковых антенн в направлении на край Земли, превышающего 8 дБ относительно изотропной антенны. Как показано в Отчете 558, закон изменения огибающей боковых лепестков, который основывается на материале Отчета 810, обеспечивается с помощью спутниковых антенн с вынесенным облучателем. Необходимость соблюдения положений Отчета 558 вытекает из оценок емкости самой фиксированной спутниковой службы; следовательно, уменьшение трудностей совмещения стало бы дополнительным преимуществом.

На рис. 1 — 4 представлены пределы возможных покрытий, достигаемых с помощью лучей шириной 2° , и показано, что степень распространения наземных сечений луча по широте зависит от разности по долготе между позицией спутника и точкой размещения земной станции. Широты, лежащие на несколько градусов севернее 40° с. ш., могут быть достигнуты при отсутствии разности или при малом разности по долготе, тогда как широты порядка 30° с. ш. могут быть покрыты при разности по долготе в 30° .

Могут использоваться лучи более широкие, чем 2° , но в этом случае края зон покрытия должны соответственно отстоять дальше от края Земли.

3.2 Потенциальные помехи космическим станциям от станций фиксированной службы

Геометрические соотношения при совмещении фиксированной службы и фиксированной спутниковой службы таковы, что только передающие станции фиксированной службы, расположенные на краю Земли (при взгляде со стороны космических станций), обладают потенциальной возможностью создавать значительные уровни помех приемным космическим станциям. Конкретные геометрические соотношения при работе в РН с использованием узких лучей на земные станции с большими углами места таковы, что высокие значения внеосевой избирательности антенны приемной космической станции (30 дБ, см. Отчет 558) могут обеспечить достаточную защиту от помех со стороны передающих станций фиксированной службы, расположенных на краю Земли, без необходимости наложения ограничений на наведение лучей или дополнительных ограничений э. и. м. спутников.

3.3 Потенциальные помехи станциям фиксированной службы, когда в полосах, используемых для линий вверх в ОН, вводится работа в РН

Введение работы в РН в полосах частот, распределенных в настоящее время для линий вверх в ОН, создаст дополнительный источник помех станциям фиксированной службы от передающих космических станций. Были оценены ограничения плотности потока мощности (ППМ), которые могут быть допустимы для приемных станций фиксированной службы, в предположении, что помехи от космических станций создают в приемнике мощность шума на 10 дБ ниже уровня теплового шума. Эта оценка показывает, что должны быть приняты ограничения ППМ ниже тех, которые указаны в Рекомендации 358, а в типичном случае в полосе частот около 6 ГГц для систем, использующих узкие лучи при работе с земными станциями с большими углами места, должны быть приняты пределы ППМ в точке прицеливания на 6 дБ ниже тех, которые указаны в Рекомендации 358.

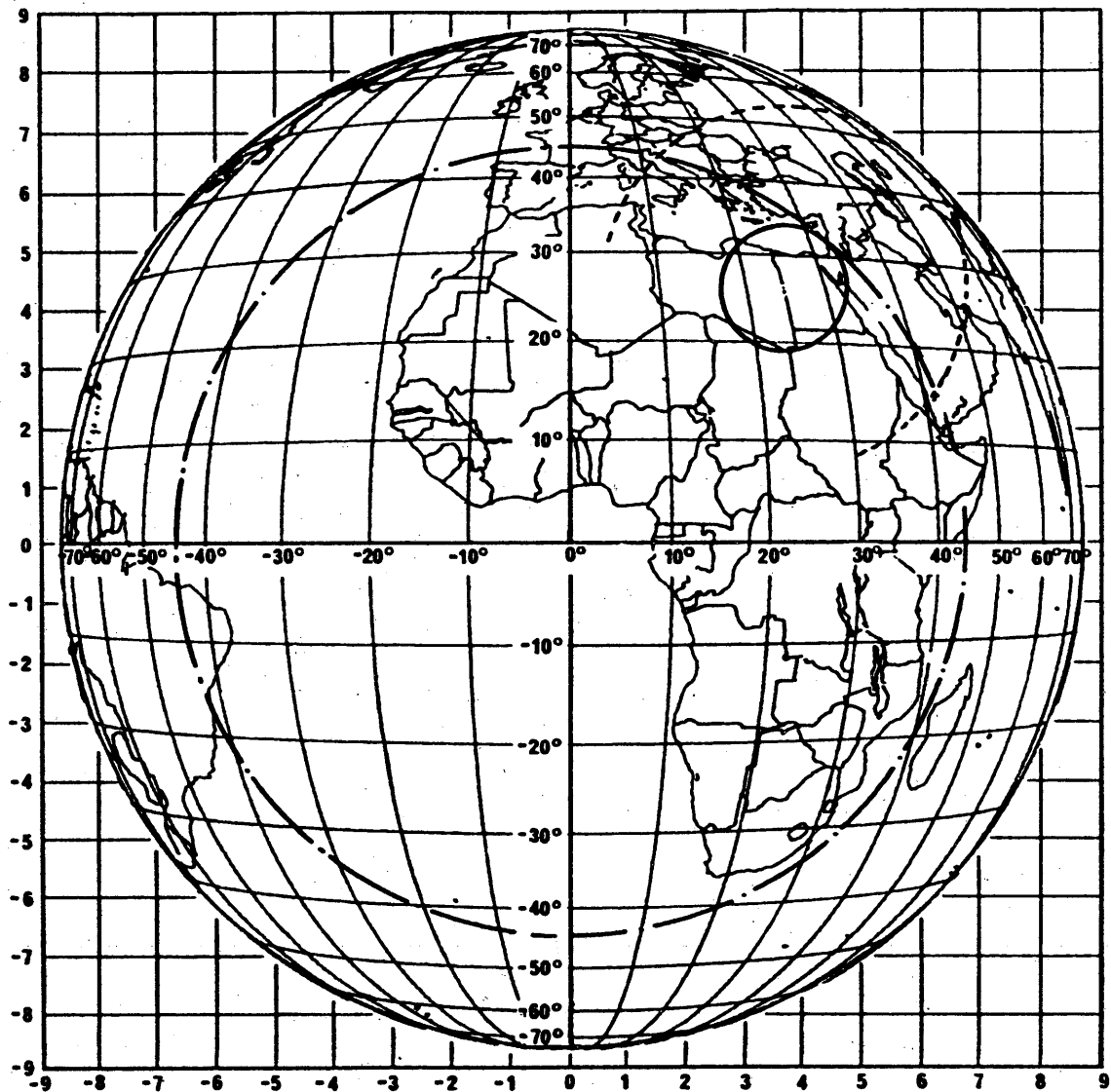


РИСУНОК 1 — Допустимая область для работы в РН с лучами шириной 2° без наложения дополнительных ограничений при совмещении с наземными службами
(Вид с геостационарной орбиты из точки на долготе 0°)

- Зона покрытия типичного луча шириной 2°
- Контур по уровню -30 дБ для луча шириной 2°
- · - · - Граница области: минимальный угол места земной станции равен 40°

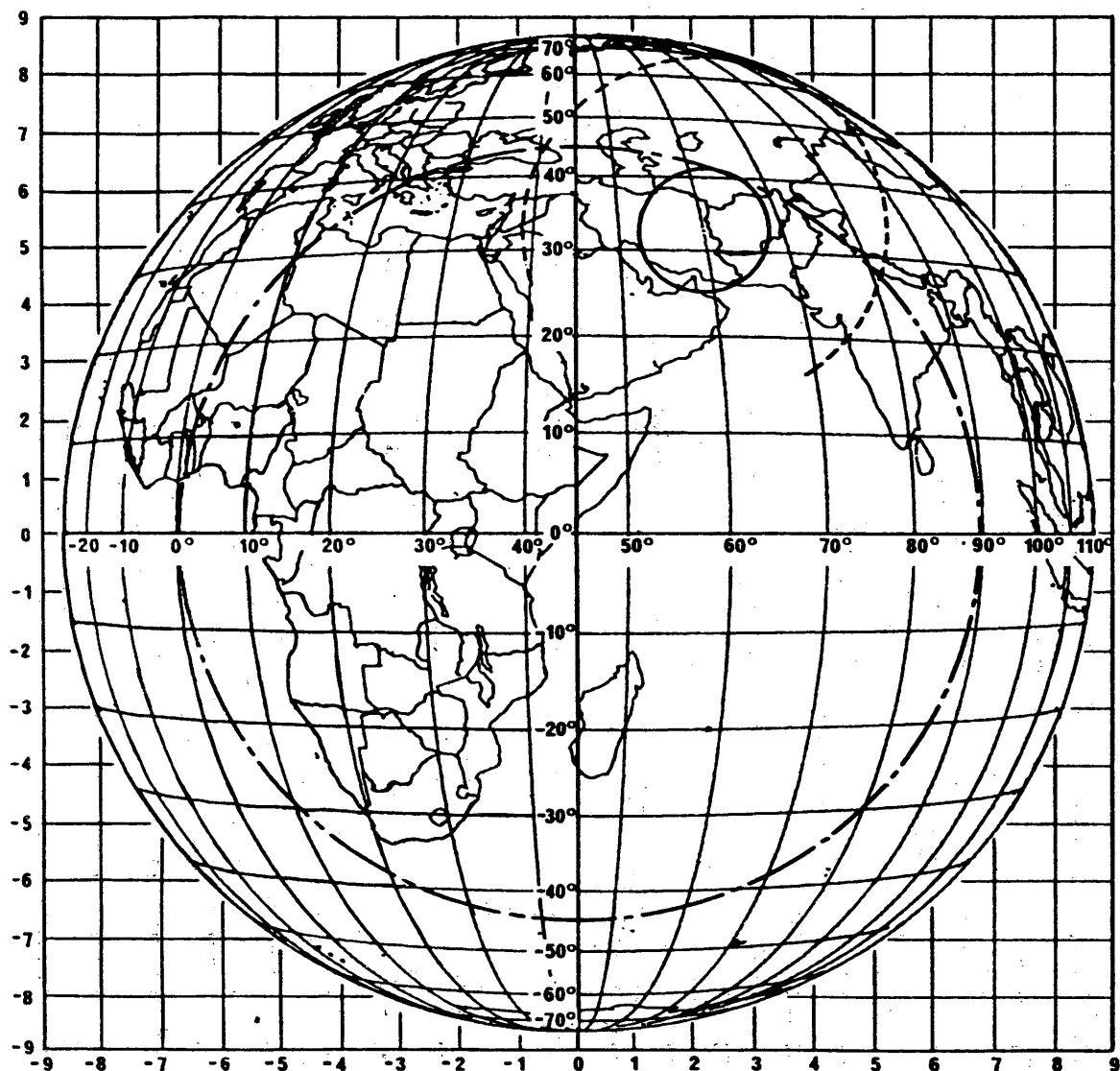


РИСУНОК 2 — Допустимая область для работы в РН с лучами шириной 2° без наложения дополнительных ограничений при совмещении с наземными службами

(Вид с геостационарной орбиты из точки на долготе 45°)

- Зона покрытия типичного луча шириной 2°
- Контур по уровню -30 дБ для луча шириной 2°
- Граница области: минимальный угол места земной станции равен 40°

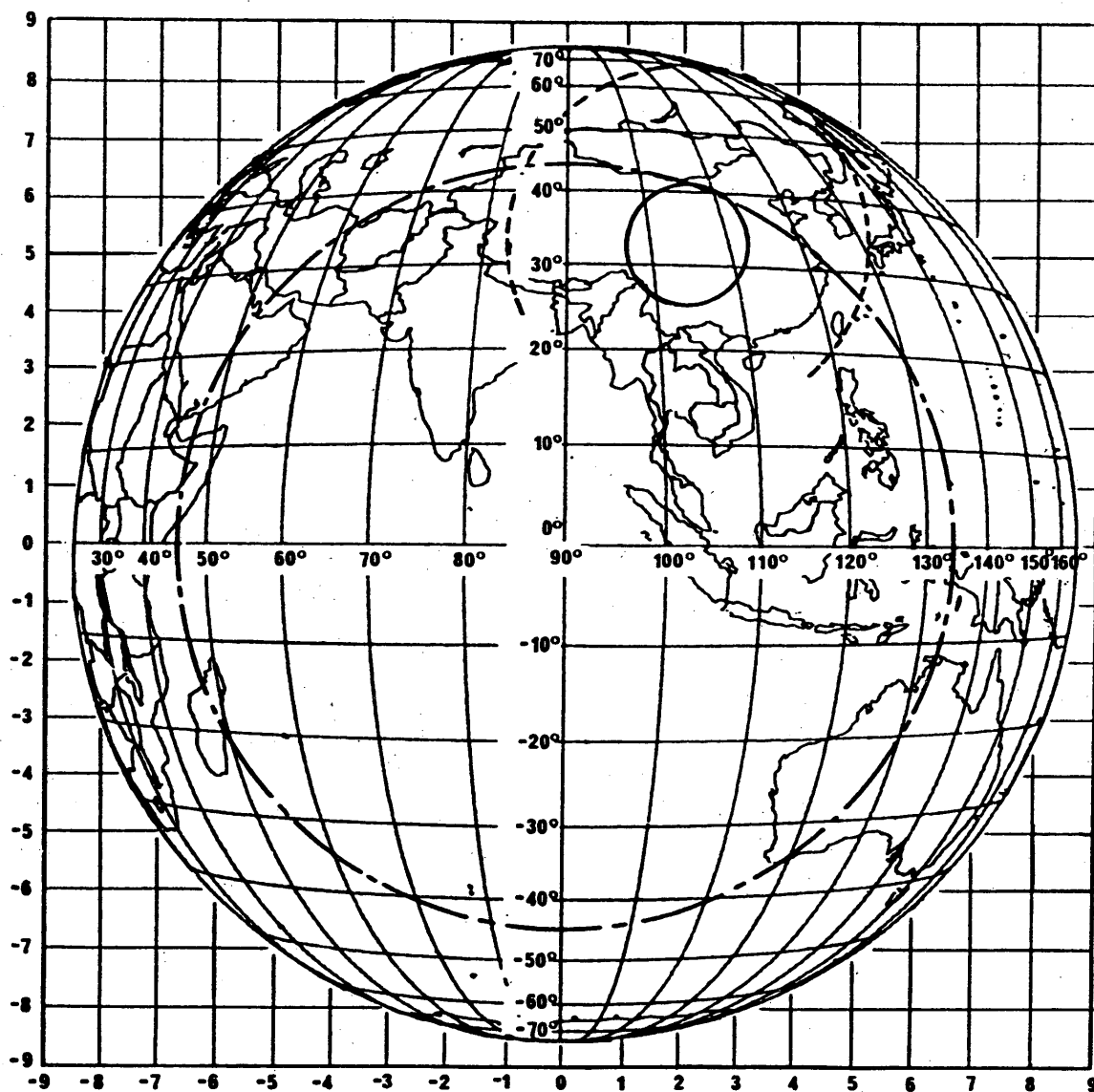


РИСУНОК 3 — Допустимая область для работы в РН с лучами шириной 2° без наложения дополнительных ограничений при совмещении с наземными службами
(Вид с геостационарной орбиты из точки на долготе 90°)

- Зона покрытия типичного луча шириной 2°
- Контур по уровню -30 дБ для луча шириной 2°
- · — · — Граница области: минимальный угол места земной станции равен 40°

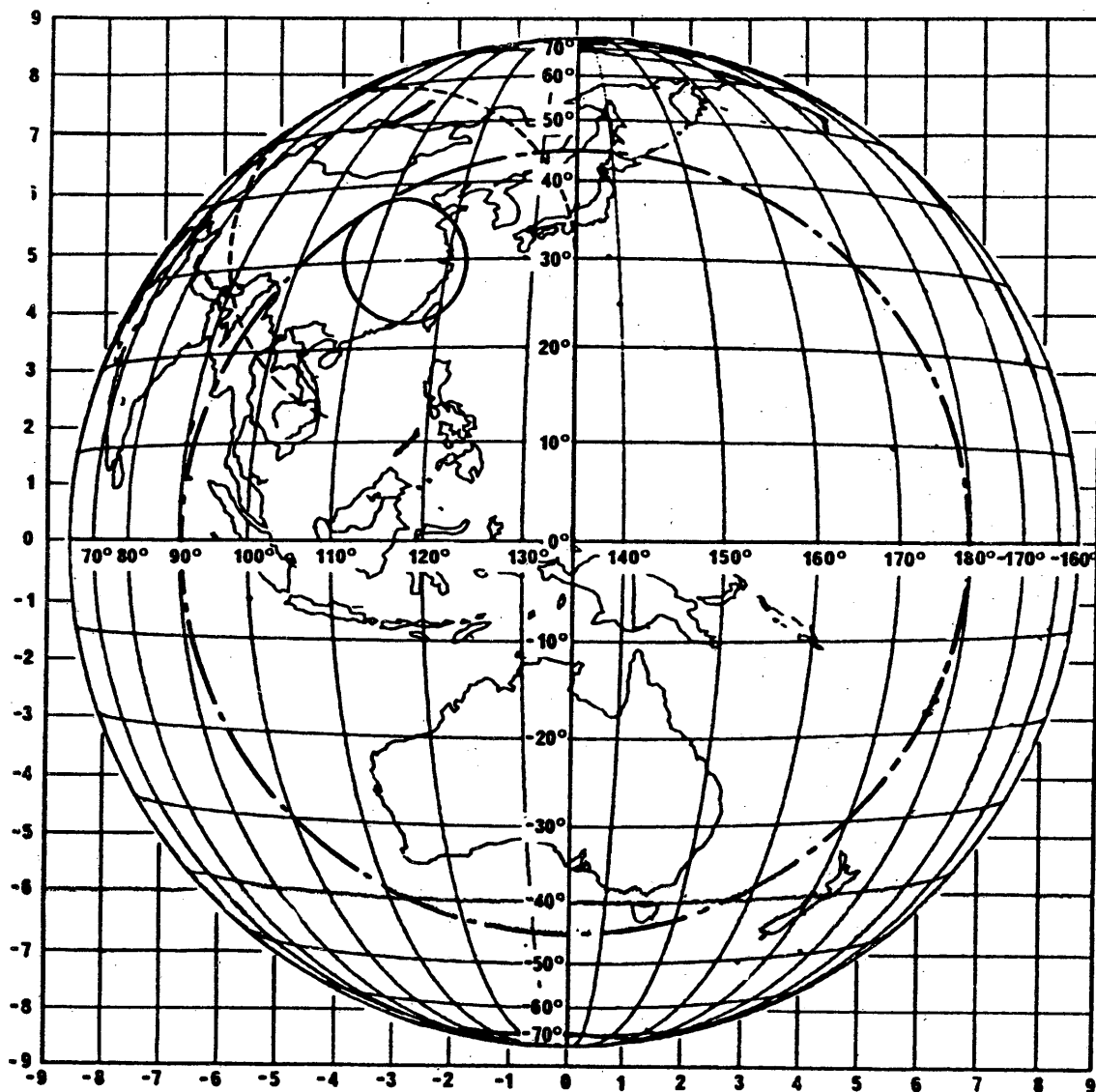


РИСУНОК 4 — Допустимая область для работы в РН с лучами шириной 2° без наложения дополнительных ограничений при совмещении с наземными службами

(Вид с геостационарной орбиты из точки на долготе 135°)

- Зона покрытия типичного луча шириной 2°
- Контур по уровню -30 дБ для луча шириной 2°
- Граница области: минимальный угол места земной станции равен 40°

3.4 Потенциальные помехи станциям фиксированной службы при введении работы в РН в полосах частот, использовавшихся для линий вниз в основном направлении

Введение работы в РН в полосах частот, распределенных в настоящее время для линий вниз в ОН, создаст источник помех станциям фиксированной службы от передающих земных станций в дополнение к помехам от передающих космических станций.

Суммарные значения перерывов связи и неготовности систем фиксированной службы будут, следовательно, определяться тремя независимыми механизмами. К этим механизмам относятся: уменьшение запаса на замирания сигнала из-за "долговременных" помех со стороны космических станций, уменьшение запаса на замирания сигнала из-за "долговременных" помех со стороны земных станций и вклад "кратковременных" помех большого уровня из-за аномального распространения радиоволн от передающих земных станций. В недавнем исследовании была проведена оценка суммарных значений перерывов связи радиорелейной системы в Соединенных Штатах Америки, использующей цифровую модуляцию (64-QAM) в предполагаемой частотной полосе, распределенной для двусторонней работы, путем вычисления вклада каждого из этих механизмов. Результаты этого исследования показывают, что в худшем случае 10% значений из разделов "РЕКОМЕНДУЕТ 2 и 3" Рекомендации 615 превышаются на три порядка от указанной величины [Pagonis и Prabhu, 1986].

Достижимый баланс между этими тремя механизмами может быть разным в разных частях мира в зависимости от конкретных особенностей. Например, в тех частях мира, где интенсивно используются геостационарные спутники, совмещение служб будет невозможно, так как оно потребует как уменьшения ограничений э.и.и.м. со спутника, так и принятия больших расстояний для разнеса между передающими земными станциями и приемными станциями фиксированной службы.

В других частях мира, где геостационарные спутники используются менее интенсивно, достижимы меньшие расстояния при разнесе.

4. Координация земных станций, работающих в РН, с наземными радиорелейными станциями

Необходимо рассмотреть обычные виды распространения радиоволн при координации земных станций, работающих в РН, и наземных радиорелейных линий, а именно, взаимодействие в условиях ясного неба, мода (1), и взаимодействие в осадках, мода (2).

Однако необходимо иметь в виду, что координационные расстояния для земных станций определяются скорее воздействием кратковременной помехи (0,01% времени) во время аномальных условий распространения, чем долговременной (в течение 20% времени). Это проявляется в больших координационных расстояниях.

Для моды (1) уровень помех в плоскости дуги большого круга, содержащего точку прицеливания, будет уменьшен по крайней мере на 22 дБ путем увеличения угла места земной станции, работающей в РН, с 5° до более чем 40° . По другим азимутам уменьшение будет меньше, но оно будет начиная с меньшего начального значения усиления антенны.

Для моды (2) вычисления более сложны, но качественно уменьшение взаимодействия может быть получено вследствие уменьшенного общего используемого объема атмосферы, что получается в результате повышения углов места с 5° до более чем 40° для земных станций, работающих в РН.

5. Работа земных станций в РН под меньшими углами места

Если пользователи сети захотят внедрить работу в РН для земных станций с меньшими ($< 40^\circ$) углами места (например, на более высоких широтах), то геометрические соотношения последовательно становятся менее благоприятными и в каждом конкретном случае должны проводиться специальные исследования. Это может оказаться практически осуществимым, но, как показано на рис. 1—4, распространение режима работы в РН на более высокие широты не должно вызывать дополнительных ограничений для стран, расположенных на более низких широтах, если используются узкие лучи.

6. Заключение

Вышеизложенное определяет пути для внедрения реализуемого режима работы в РН таким способом, при котором значительно снижается объем трудностей совмещения с наземными радиорелейными линиями. Представляется, что наиболее благоприятные геометрические соотношения, получаемые у земных станций с большими углами места, что типично для узких лучей (обыкновенно 2°) в сетях, обслуживающих страны, расположенные на широтах менее 40° , дают возможность сочетать сети, работающие в ОН, некоторые национальные и субрегиональные сети, работающие в РН, и наземные радиорелейные сети в гораздо большей степени, чем это возможно в странах, расположенных на более высоких широтах, в частности, в тех частях мира, где менее интенсивно используется геостационарная орбита. Необходимы дальнейшие исследования систем, использующих широкие лучи.

ССЫЛКИ

PAGONES, M.J. and PRABHU, V.K. [1986] Effect of interference from geostationary satellites on the terrestrial radio network — A case study with bidirectional transmission. *AT&T Tech. J.*

ОТЧЕТ 790-1

Э. и. и. м. и ПРЕДЕЛЫ МОЩНОСТИ НАЗЕМНЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ СОВМЕСТНО С ЦИФРОВЫМИ СПУТНИКОВЫМИ СИСТЕМАМИ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ ОТ 11 ДО 14 ГГц И ОКОЛО 30 ГГц

(Вопросы 32/4 и 17/9, Исследовательская Программа 17Е/9)

(1978—1982)

1. Введение

Существующие пределы мощности, подводимой к входу антенны, и э.и.и.м. наземных радиорелейных станций в совместно используемых полосах частот от 11 до 14 ГГц и около 30 ГГц на линии вверх были изучены в основном на базе исследований, предполагавших передачу с помощью ЧМ. В данном Отчете рассматривается их применимость к цифровым спутниковым системам, использующим 4-фазную ФМ. Принятые для данного исследования модели спутниковых систем и плотность расположения радиорелейных станций совпадают с теми, которые предполагались в первоначальных исследованиях с ЧМ.

2. Оценка уровня допустимой помехи в приемнике спутника

В Рекомендации 522 норма на долговременный показатель качества для гипотетической эталонной цифровой цепи (ГЭЦ), по которой передаются телефонные сигналы с помощью ИКМ, сводится к тому, что на выходе ГЭЦ коэффициент ошибок не должен превышать средней за 10 минут величины 10^{-6} для более чем 20% времени любого месяца.

Поскольку изменения во времени уровней помех от наземных источников, поступающих на линии вверх на спутник, вероятно, будут малы, использование критерия допустимой помехи, основанного на этом долговременном показателе качества, является правомерным. В связи с этим 10% мощности шума, вызывающего коэффициент ошибки до 10^{-6} , приняты в качестве оценки ограничения допустимых уровней помех на спутнике.

Целесообразно также полагать, что влияние помех является относительно независимым от спектрального распределения мешающего сигнала, что представляет собой существенный показатель в отношении мощности мешающего сигнала, попадающего в полосу соответствующего приемника.

Рассмотрим теперь спутниковую систему, использующую 4-фазную ФМ/МДВР и работающую на скоростях, близких к 120 Мбит/с (ширина полос частот 72 МГц). Для такой системы требуемое отношение сигнал/шум (C/N) для достижения на линии коэффициента ошибки 10^{-6} при обычных условиях эксплуатации предполагается равным приблизительно 17 дБ и не зависит от используемых радиочастот. Следовательно, при критерии, составляющем 10% шума, допустимое отношение сигнал/суммарная наземная помеха должно быть 27 дБ. Обоснованно предположая, что допустимая помеха делится между линиями вверх и вниз поровну, приходим к отношению сигнал/наземная помеха (C/I_n) на линии вверх, равному 30 дБ.

Очевидно, что итоговый уровень помехи на входе приемника спутника зависит от уровня сигнала, который, в свою очередь, зависит от распределения шумов на линии вверх. Допуску на линии вверх, составляющему 10% от суммарного шума, соответствует отношение сигнал/шум (C/N_u) 27 дБ. Соответствующие значения C/N_u на линии вверх для 20 и 40% суммарных шумов равны 24 и 21 дБ. Кроме того, для шумовой температуры спутниковой системы в 1000 К, которая считается разумным минимумом для систем, эксплуатируемых в обозримом будущем на рассматриваемых частотах, входной шум (N_u) равен kTB , что в полосе 72 МГц выразится уровнем — 120 дБВт. Таким образом, уровни сигнала для 10, 20 и 40% допустимых шумов на линии вверх составляют — 93, — 96 и — 99 дБВт, соответственно. Следовательно, используя величину C/I_n , равную 30 дБ, получим, что допустимые уровни помех (I_n) для трех вариантов шумов на линии вверх (10, 20 и 40% от суммарных шумов) равны — 123, — 126 и — 129 дБВт, соответственно.

Далее, наземная помеха, поступающая на вход приемника спутника, может быть двух типов — “прямая” и “непрямая”. Рассматриваемая здесь “прямая” помеха подразумевает помеху от радиорелейных станций, направленных на геостационарную орбиту в пределах $0,5^\circ$, тогда как “непрямая” помеха поступает от радиорелейных станций, не направленных на геостационарную орбиту. При предположении, что допустимая помеха на линии вверх должна делиться между “прямой” и “непрямой” помехой поровну, допустимые уровни для каждого вида становятся равными — 126, — 129 и — 132 дБВт, соответственно, для систем, имеющих на линии вверх распределение шумов 10, 20 и 40%.

3. Максимально допустимые уровни передачи для радиорелейных станций

Максимальные уровни мощности радиорелейной станции, соответствующие критерию помехи, приведенному выше, представлены в таблицах I—III для двух типов приемных спутниковых антенн — с полным покрытием видимой части Земли и с узким лучом. При выводе этих данных были сделаны следующие дополнительные предположения:

3.1 Предположения, общие для 11 и 30 ГГц

- Прямая помеха создается радиорелейными станциями, находящимися на горизонте видимости спутника, то есть на краю луча антенны с полным покрытием видимой части Земли. В случае применения антенн с узким лучом прямая помеха возникает от радиорелейных станций, находящихся вне основного луча.
- Непрямая помеха возникает от радиорелейных станций, находящихся в пределах зоны покрытия спутникового луча.
- Антенна с полным покрытием видимой части Земли имеет среднее усиление 18,5 дБ и усиление на краю луча 17 дБ.
- Число радиорелейных станций, находящихся в пределах зоны покрытия антенны с узким лучом, пропорционально квадрату ширины луча.
- Ширина луча в 1° и усиление в 43 дБ для антенны с узким лучом. *Примечание.* — Так как усиление антенны обратно пропорционально квадрату ширины луча и число радиорелейных станций, находящихся в пределах луча, предполагается также пропорциональным квадрату ширины луча, приемлемый уровень передачи для единичной станции, находящейся в пределах луча, относительно независим от предполагаемой ширины луча.
- Среднее усиление вне луча спутниковых антенн с узким лучом в направлении на горизонт спутника — не более 17 дБ.
- Среднее усиление вне луча антенн передающих радиорелейных станций в направлении на спутник равно —6 дБ.
- Поляризационная развязка для наземных станций, расположенных в пределах зоны покрытия (непрямая помеха), составляет 3 дБ.
- Поляризационная развязка для наземных станций, создающих прямую помеху, отсутствует.
- Максимальная э. и. и. м. наземной станции составляет E дБВт в каждом радиочастотном канале. Это — параметр, необходимый при рассмотрении прямой помехи спутниковой системе.
- Средняя мощность ($P - 3$) дБВт в каждом радиочастотном канале на входе антенны наземной станции, где P дБВт — максимально допустимый входной уровень. Это — параметр, необходимый при рассмотрении не прямой помехи, поскольку усиление антенны наземной станции вне основного луча в значительной мере не зависит от усиления в основном луче.
- Ширина полосы частот радиорелейного канала на частоте 30 ГГц может быть до 220 МГц.
- В полосах частот около 11 ГГц могут использоваться как широкополосные, так и узкополосные системы. Узкополосные системы передачи на небольшие расстояния работают в типичном случае примерно при 35 дБВт и не подвергаются ограничениям в отношении направления антенны. Узкополосные системы передачи на большие расстояния будут, вероятнее всего, работать с большими уровнями мощности и могут быть подвергнуты ограничениям в соответствии с пунктом 2503 Регламента радиосвязи.

3.2 Предположения в отношении работы в полосах частот около 11 ГГц

- 17 500 наземных станций, использующих те же несущие частоты, что и спутниковая служба, и находящихся в пределах полной видимой зоны покрытия спутника, но с антеннами, направленными в сторону от спутника по крайней мере на $1,5^\circ$. Это предположение основано на средней плотности размещения радиорелейных станций, составляющей примерно 1 на 2500 км^2 населенной части зоны покрытия; для целей данного расчета за населенную часть принимается одна пятая полной видимой зоны покрытия.
- 120 наземных станций, использующих те же несущие частоты, что и спутниковая служба, и находящихся в пределах 1° зоны покрытия антенн с узким лучом, но с антеннами, направленными в сторону от спутника по крайней мере на $1,5^\circ$. Это предположение основано на средней плотности размещения радиорелейных станций, составляющей 1 на 2500 км^2 .
- Только одна наземная станция, использующая ту же несущую частоту, что и спутниковая служба, и находящаяся на горизонте относительно спутника, имеет направление луча антенны в пределах $0,5^\circ$ от направления на спутник (см. приложение I).
- Основные потери передачи в свободном пространстве имеют среднее значение 205 дБ и максимальное значение 206 дБ.
- Затухание в атмосфере при угле места около нуля не превышает 5 дБ в течение более чем 20% времени (ясная погода).
- Среднее затухание в атмосфере при ясной погоде составляет 2,5 дБ при рассмотрении не прямой помехи, действующей на приемник спутника с полдой видимой зоны покрытия Земли (изменение угла места от $1,5$ до 90°).

3.3 Предположения в отношении работы в полосах частот около 30 ГГц

- 5000 наземных станций, использующих те же несущие частоты, что и спутниковая служба, и находящихся в пределах луча шириной 1° спутниковой антенны, но с антеннами, направленными в сторону от спутника по крайней мере на $1,5^\circ$. Это предположение основано на средней плотности размещения радиорелейных станций, составляющей приблизительно 1 на 64 км^2 .
- Прием с зоны полного покрытия видимой части Земли на этих частотах спутниками не используется.
- Число наземных станций, использующих те же несущие частоты, что и спутниковая служба, и находящихся на горизонте относительно спутника, но с лучами антенн, направленными в пределах $0,5^\circ$ относительно спутника, составляет 19 (см. приложение I).
- Затухание в атмосфере при угле места около нуля не превышает 12 дБ в течение более чем 20% времени.
- Потери передачи в свободном пространстве имеют среднее значение 214 дБ и максимальное значение 215 дБ.

4. Прямая помеха, создаваемая радиорелейной станцией в основном луче узконаправленной антенны

Анализ, выполненный в пункте 3, не включал частный случай, когда существует прямая помеха от радиорелейной станции в основном луче узконаправленной спутниковой приемной антенны, направленной на горизонт относительно спутника. Максимально допустимые уровни э. и. и. м. радиорелейной станции при этих условиях приведены на рис. 1 для семейства лучей узконаправленной антенны разной ширины. При построении рис. 1 в дополнение к предположениям, перечисленным в таблице IV, были сделаны следующие допущения:

- на частоте 30 ГГц только одна радиорелейная станция дает прямую помеху этого вида;
- в случае применения узконаправленной спутниковой антенны усиление в направлении на радиорелейную станцию в основном луче и вклад в прямую помеху на 2 дБ меньше, чем усиление по оси луча, то есть для луча шириной 1° оно будет равно 42,5 дБ;
- весь бюджет помех на линии вверх представлен прямой помехой, поскольку не прямые помехи настолько малы, что ими можно пренебречь.

5. Заключение

Максимально допустимая мощность, подаваемая к входу антенны, и уровни э. и. и. м. радиорелейных станций в совместно используемых полосах частот от 11 до 14 ГГц и около 30 ГГц были рассмотрены в контексте помех цифровым спутниковым системам. Результаты расчетов диапазона пропорций шума на линии вверх в спутниковых системах приведены в таблицах I—III, за исключением случая, когда радиорелейные станции создают прямую помеху в узконаправленном луче антенны спутника. С учетом более точных уровней для каждой из двух частотных полос мощность P , подаваемая к входу антенны, и пределы э. и. и. м. наземных станций должны быть следующими:

$P = 18 \text{ дБВт}$ и э. и. и. м. = 59 дБВт, когда совместно используемые частоты находятся в пределах от 11 до 14 ГГц, и

$P = 19 \text{ дБВт}$ и э. и. и. м. = 70 дБВт, когда совместно используемые частоты находятся вблизи 30 ГГц.

Поскольку рекомендованный уровень мощности, подаваемой к входу антенны, и пределы э. и. и. м., указанные в Рекомендации 406 для радиорелейных станций, использующих эти частоты совместно со спутниковыми системами, составляют 10 и 55 дБВт, соответственно, можно сделать вывод о том, что цифровые спутниковые системы, работающие в полосах частот от 11 до 14 ГГц и около 30 ГГц, достаточно защищены.

Анализ, приведенный в пункте 4, относится к случаю, когда имеет место прямая помеха от наземной радиорелейной станции, попадающая в узконаправленную приемную антенну спутника, направленную в сторону горизонта.

Результаты этого анализа показывают, что на частоте 11 ГГц прямое попадание сигнала с э. и. и. м. 55 дБВт в узкий луч может создавать повышенную помеху. Однако в Регламенте радиосвязи рекомендуется, чтобы антенны радиорелейных станций, работающих в полосах частот от 10 до 15 ГГц, не наводились, по мере возможности, в пределах $\pm 1,5^\circ$ на геостационарную орбиту, если э. и. и. м. радиорелейной станции превышает 45 дБВт. При э. и. и. м. 45 дБВт прямая помеха, попадающая в основной луч узконаправленной приемной антенны в полосе частот около 11 ГГц, может быть допустимой для узконаправленных лучей с шириной менее 1° . При величинах э. и. и. м. от 35 до 45 дБВт прямая помеха, попадающая в основной луч, может быть допустимой для узконаправленных лучей шириной от 1 до 4° . На частоте 30 ГГц помеха допустима для узконаправленных лучей с шириной менее $0,5^\circ$.

Очевидно, что в целях определения желаемого влияния на критерий совместного использования частот для относительно редкого случая применения приемной спутниковой антенны с узким лучом, направленным на горизонт, требуется дальнейшее исследование.

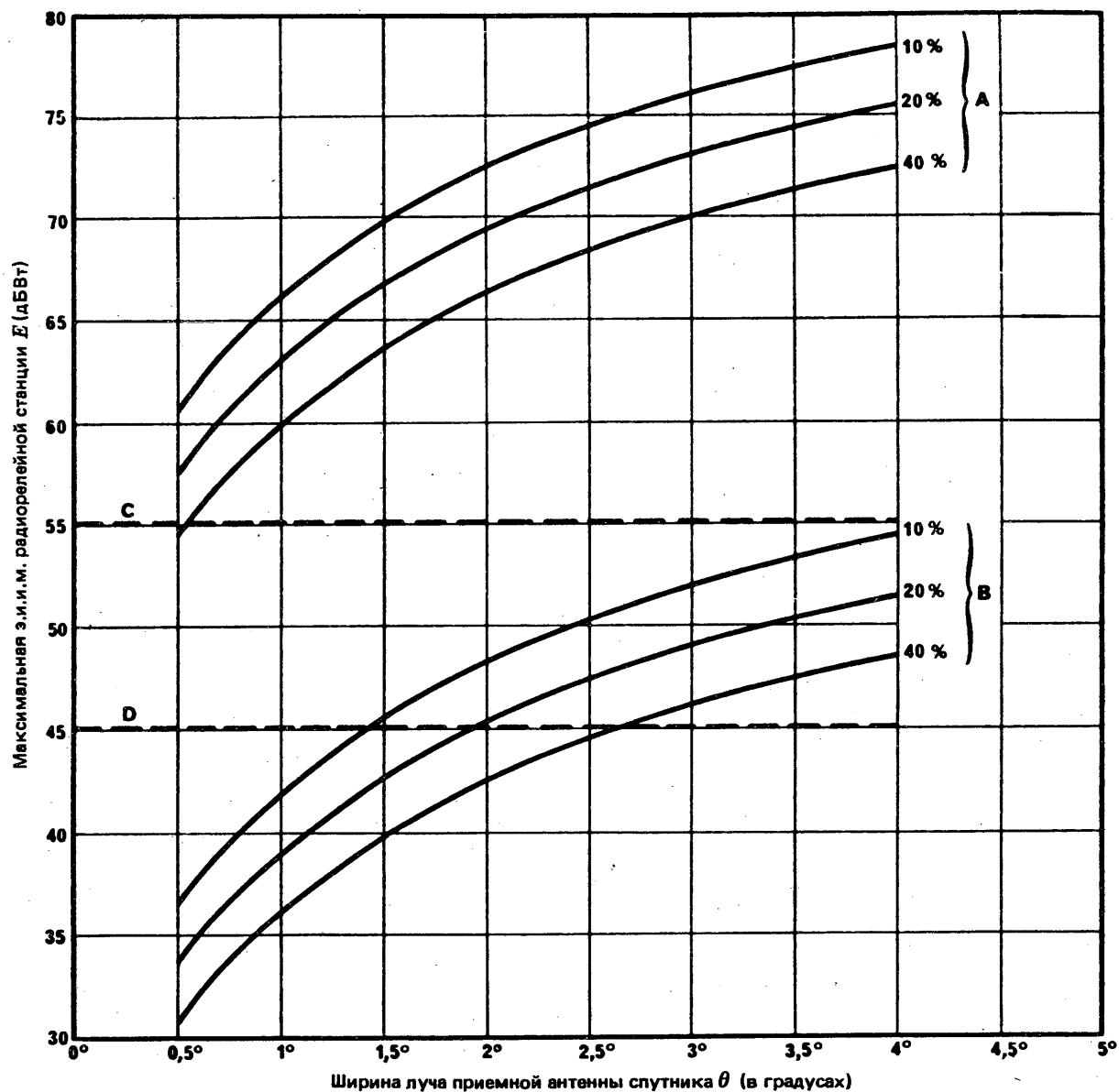


РИСУНОК 1 — Максимальная э.и.и.м. (E) наземной радиорелейной станции, не превышающая критерия помехи для приемной антенны спутника с шириной луча θ , при направлении луча на горизонт

- A: Распределение шумов на линии вверх на частоте 30 ГГц
- B: Распределение шумов на линии вверх на частоте 11 ГГц
- C: Предел э.и.и.м. согласно пункту 2504 Регламента радиосвязи для полос частот выше 15 ГГц (без ограничений наведения)
- D: Предел э.и.и.м. согласно пункту 2503 Регламента радиосвязи для станций с наведением антенны в пределах $\pm 1,5^\circ$ относительно геостационарной орбиты в полосах частот от 10 до 15 ГГц

Прямая помеха в луче узконаправленной приемной антенны спутника приводит к вероятному совместному возникновению нескольких редких событий. Эта помеха появляется, в частности, только тогда, когда узкий луч используется при малом угле места ($<15^\circ$) и когда внутри зоны покрытия антенна по крайней мере одного наземного передатчика направлена прямо на спутник. На средних широтах в большинстве случаев используются узконаправленные лучи спутника с гораздо большими углами места, так что прямое попадание в луч невозможно. В этих ситуациях существенно проявляется избирательность приемной антенны спутника. Тем не менее, даже в этом редком случае, когда имеет место прямая помеха, допустимый уровень помехи не превышает.

ТАБЛИЦА 1 — Работа в полосе частот около 11 ГГц
(Полное покрытие видимой части Земли)

	Источник помехи	
	17 500 наземных станций в луче спутника	Одна наземная станция с лучом антенны, направленным на спутник
Средняя мощность, подводимая к входу антенны каждой радиорелейной станции (дБВт), на радиочастотный канал	$P - 3$	—
Максимальная э.и.и.м. наземного передатчика (дБВт) на радиочастотный канал	—	E
Среднее значение усиления наземной антенны вне луча в направлении на спутник (дБ)	—6	—
$10 \log$ (Число наземных передатчиков)	42,5	0
$10 \log$ (Число радиочастотных каналов в полосе 72 МГц при передаче со спутника 120 Мбит/с)	3	3
Основные потери передачи в свободном пространстве (дБ)	205	206
Затухание в атмосфере, не превышаемое в течение более чем 20% времени (дБ)	2,5	5
Поляризационная развязка (дБ)	3	0
Усиление антенны спутника (дБ)	18,5	17
Максимальная мощность, подводимая к входу антенны (P) от радиорелейной станции, не превышающая уровня помех (дБВт) на радиочастотный канал	10% шумов на линии вверх: +29,5 20% шумов на линии вверх: +26,5 40% шумов на линии вверх: +23,5	—
Максимальная э.и.и.м. (E) радиорелейной станции, не превышающая уровня помех (дБВт на радиочастотный канал)	—	10% шумов на линии вверх: +65,0 20% шумов на линии вверх: +62,0 40% шумов на линии вверх: +59,0

ТАБЛИЦА II — Работа в полосе частот около 11 ГГц
(Покрывие узким лучом)

	Источник помехи	
	120 наземных станций в луче спутника	Одна наземная станция с лучом антенны, направленным на спутник
Средняя мощность, подводимая к входу антенны каждой радиорелейной станции (дБВт), на радиочастотный канал	$P - 3$	—
Максимальная э.и.и.м. наземного передатчика (дБВт) на радиочастотный канал	—	E
Среднее значение усиления наземной антенны вне луча в направлении на спутник (дБ)	—6	—
$10 \log$ (Число наземных передатчиков)	21,0	0
$10 \log$ (Число радиочастотных каналов в полосе 72 МГц при передаче со спутника 120 Мбит/с)	3	3
Основные потери передачи в свободном пространстве (дБ)	205	206
Затухание в атмосфере, не превышаемое в течение более чем 20% времени (дБ)	0	5
Поляризационная развязка (дБ)	3	0
Усиление антенны спутника (дБ)	43	17
Максимальная мощность, подводимая к входу антенны (P) от радиорелейной станции, не превышающая уровня помех (дБВт) на радиочастотный канал	10% шумов на линии вверх: +24,0 20% шумов на линии вверх: +21,0 40% шумов на линии вверх: +18,0	—
Максимальная э.и.и.м. (E) радиорелейной станции, не превышающая уровня помех (дБВт на радиочастотный канал)	—	10% шумов на линии вверх: +65,0 20% шумов на линии вверх: +62,0 40% шумов на линии вверх: +59,0

ТАБЛИЦА III — Работа в полосе частот около 30 ГГц
(Покрывание узким лучом)

	Источник помехи	
	5000 наземных станций в луче спутника	19 наземных станций с лучом антенны, наведенным на спутник
Средняя мощность, подводимая к входу антенны каждой радиорелейной станции (дБВт), на радиочастотный канал	$P - 3$	—
Максимальная э.и.и.м. наземного передатчика (дБВт) на радиочастотный канал	—	E
Среднее значение усиления наземной антенны вне луча в направлении на спутник (дБ)	—6	—
$10 \log$ (Число наземных передатчиков)	37	13
$10 \log$ (Число радиочастотных каналов в полосе 72 МГц при передаче со спутника 120 Мбит/с)	—5	—5
Основные потери передачи в свободном пространстве (дБ)	214	215
Затухание в атмосфере, не превышаемое в течение более чем 20% времени (дБ)	0	12
Поляризационная развязка (дБ)	3	0
Усиление антенны спутника (дБ)	43	17
Максимальная мощность, подводимая к входу антенны (P) от радиорелейной станции, не превышающая уровня помех (дБВт) на радиочастотный канал	10% шумов на линии вверх: +17,0 20% шумов на линии вверх: +14,0 40% шумов на линии вверх: +11,0	—
Максимальная э.и.и.м. (E) радиорелейной станции, не превышающая уровня помех (дБВт на радиочастотный канал)	—	10% шумов на линии вверх: +68,0 20% шумов на линии вверх: +65,0 40% шумов на линии вверх: +62,0

ТАБЛИЦА IV. — Работа в полосах частот около 11 и 30 ГГц
(Покрывание узким лучом)
Прямая помеха — одна из наземных станций, создающая прямую помеху,
находится в основном луче антенны спутника

	Источник помехи	
	Одна наземная станция, находящаяся в основном луче спутника и имеющая свою антенну, наведенную на спутник	
	11 ГГц	30 ГГц
Максимальная э.и.и.м. наземного передатчика (дБВт на радиочастотный канал)	E	E
$10 \log$ (Число наземных передатчиков в основном луче)	0	0
$10 \log$ (Число радиочастотных каналов в полосе 72 МГц при передаче со спутника 120 Мбит/с)	3	—5
Основные потери в свободном пространстве (дБ)	206	215
Затухание в атмосфере, не превышаемое в течение более чем 20% времени (дБ)	5	12
Усиление антенны спутника в направлении на наземную станцию в основном луче (дБ)	$42,5 - 20 \log \theta$, где θ — ширина диаграммы направленности антенны спутника	
Поляризационная развязка (дБ)	0	0
Максимальная э.и.и.м. наземной радиорелейной станции (E), не превышающая ограничения по помехе (дБВт на радиочастотный канал)	См. рис. 1	См. рис. 1

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО ЧИСЛА РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СТАНЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В ПОЛОСАХ ЧАСТОТ ОКОЛО 11 И 30 ГГц С ВЕРОЯТНЫМ НАВЕДЕНИЕМ ЛУЧЕЙ АНТЕНН В ПРЕДЕЛАХ $0,5^\circ$ ОТНОСИТЕЛЬНО ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

Площадь шарового пояса Земли, в пределах которого угол места на данный спутник лежит в пределах $0,5^\circ$, равна

$$S = \pi \cdot d \cdot l, \quad (1)$$

где

d = максимальный диаметр зоны покрытия Земли с геостационарного спутника (12 600 км);

l = длина дуги на поверхности Земли с углом $0,5^\circ$ относительно центра Земли = 55,5 км;

тогда $S = \pi \times 12\,600 \times 55,5 \text{ км}^2$.

Обитаемая часть площади шарового пояса (предполагается 20%) S_h составляет

$$S_h = 4,4 \times 10^5 \text{ км}^2.$$

Число радиорелейных станций, расположенных на этой поверхности и работающих в полосе около 11 ГГц, при плотности в одну станцию на $2500 \text{ км}^2 = 175$.

При условии случайного распределения азимутальных направлений число радиорелейных станций, имеющих направление антенн в пределах $0,5^\circ$ относительно азимутального положения геостационарного спутника, равно:

$$\frac{1}{360} \times 175 \approx 0,5 \text{ (принимаем 1).}$$

Наряду с этим, предполагая, что плотность размещения радиорелейных станций составляет 1 на 64 км^2 , получаем, что число станций, работающих в полосе частот около 30 ГГц и имеющих антенны, направленные в пределах $0,5^\circ$ относительно геостационарной орбиты, равно

$$\frac{4,4 \times 10^5}{64} \times \frac{1}{360} \approx 19.$$

ОТЧЕТ 1006 *

ПРЕДЕЛЫ э.и.и.м. ФИКСИРОВАННОЙ СЛУЖБЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ФИДЕРНЫХ ЛИНИЙ РАДИОВЕЩАТЕЛЬНЫХ СПУТНИКОВ НА ЧАСТОТАХ ОКОЛО 18 ГГц

(Вопросы 32/4 и 17/9, Исследовательская Программа 17Е/9)

(1986)

1. Введение

Пределы для э. и. и. м. передатчиков фиксированной службы (ФС) даны в Рекомендации 406. Однако эти пределы были выведены из условия защиты фиксированной спутниковой службы (ФСС). В результате, когда рассматривается защита радиовещательной спутниковой службы (РСС), имеется особая необходимость ограничить в большей степени ухудшение качества фидерных линий для того, чтобы создать больший запас качества для линии вниз.

Технические параметры систем ФСС в диапазоне выше 15 ГГц существенно отличаются от параметров РСС. В связи с этим требуется проведение отдельного исследования защиты фидерных линий РСС. Вполне вероятно, что ФСС будут использовать цифровую модуляцию, тогда как РСС будут использовать ЧМ с более узкими полосами частот. Кроме того, РСС требует защиты от помех собственных аналоговых телевизионных сигналов, в то время как ФСС должна быть защищена от помех цифровым передачам.

2. Допустимые помехи в спутниковом приемнике

В Отчете Подготовительного собрания к конференции (ПСК) 1982 года по техническим основам для РАКР САТ-R2 предложены технические параметры для РСС. Они включают отношение сигнал/шум при замираниях сигнала $(C/N)_u$, равное 14 дБ. Эта величина включает запас на замирание 6,5 дБ, которое не должно превышать в течение 99% времени худшего месяца. Следовательно, в условиях ясного неба величина $(C/N)_u$, равная 20,5 дБ, является полной целевой характеристикой, в которой должно учитываться влияние помех. Следует полагать, что помехи ФС будут иметь вид аддитивного шума, так как цифровая телефония имеет шумоподобный спектр. Кроме того, в Отчете ПСК предлагается, чтобы ухудшение, вносимое фидерными линиями в общую величину, не превышало 0,5 дБ.

Предположим, что замирания на линиях вниз и вверх совпали по времени и что для 99% времени величина замираний на линии вверх составляет 10 дБ. В результате отношение сигнал/шум $(C/N)_u$ на линии вверх в условиях ясного неба составляет:

$$(C/N)_u = 14,5 + 9,1 + 10,0 = 33,6 \text{ дБ,}$$

и отношение сигнал/шум $(C/N)_d$ на линии вниз составляет:

$$(C/N)_d = 14,5 + 6,5 = 21,0 \text{ дБ.}$$

* Данный Отчет должен быть доведен до сведения 10-й и 11-й Исследовательских Комиссий.

В общем случае совместное использование частот основывается на принципе, в соответствии с которым обе службы, совместно использующие полосу на равноправной основе, могут принимать допустимые уровни помех.

Логично полагать, что в этом случае допустимая помеха от ФС внесет ухудшение до 1 дБ на линии вверх. Это приведет к дополнительному ухудшению в общем отношении (C/N) , только на 0,12 дБ. Вклад 1 дБ на линии вверх аналогичен вышеуказанным случаям совмещения между ФС и другими космическими службами, особенно выше 15 ГГц. Общий вклад 0,12 дБ является неожиданно низким и приблизительно на порядок меньше обычного. Этот несущественный вклад выходит за рамки принципа, в соответствии с которым общий проект РСС не должен ставиться под угрозу, и предполагает, что при других обстоятельствах дополнительная помеха на линии вверх может быть приемлемой.

Таким образом, для принятой модели допустимая помеха на линии вверх со стороны передатчиков ФС будет:

$$(C/I)_u = (C/N)_u + 6 = 39,6 \text{ дБ}.$$

Мало вероятно, чтобы из общего количества передатчиков ФС, находящихся в зоне видимости со спутника, был непосредственно виден более чем один передатчик или чтобы вклад от остальных передатчиков был значительным. В соответствии с этим минимальная норма $(C/I)_u$ составит 39,6 дБ.

3. Расчет $(C/I)_u$ в спутниковом приемнике

В качестве типичного значения э. и. и. м. для передатчиков фидерных линий РСС в Районе 2 была принята величина 86 дБВт. Используя эту цифру и максимальный предел э. и. и. м. 55 дБВт для одного мешающего передатчика ФС, можно рассчитать отношение сигнал/помеха на входе спутникового приемника. Разность э. и. и. м. двух передатчиков — РСС и ФС — составляет 31 дБ в пользу передатчика РСС, и, учитывая, что трасса сигнала ФС проходит по касательной к поверхности Земли, получаем на трассе дополнительное затухание по крайней мере 5 дБ из-за атмосферного поглощения, вносимое в мешающий сигнал ФС, который принимается на спутнике. Кроме того, можно ожидать дополнительной развязки в 3 дБ сигналов на входе приемника спутника из-за использования круговой поляризации на фидерных линиях РСС и линейной поляризации в ФС. И наконец, ожидается разница в 1 дБ между потерями в свободном пространстве на трассе мешающего сигнала ФС и на трассе фидерной линии РСС. Следовательно, минимальное значение $(C/I)_u$ равно:

$$(C/I)_u = 31 + 5 + 3 + 1 = 40 \text{ дБ}.$$

В результате в соответствии с положениями Рекомендации 406 адекватная защита обеспечивается полностью.

4. Дополнительные источники уменьшения помех

Влияние помех от передатчиков ФС будет, по-видимому, намного ниже величины, рассчитанной в предыдущем разделе, по следующим причинам. Во-первых, любая разность ширины полосы в пользу ФС будет еще больше уменьшать помехи ФС на линиях РСС вверх. Например, если ФС занимает радиочастотную полосу 220 МГц, то обеспечивается дополнительное уменьшение помехи приблизительно на 10 дБ. Дополнительное уменьшение помехи на входе космической станции может также происходить из-за пространственной избирательной антенны, особенно когда антенна линии вверх РСС имеет большой угол места. И наконец, работа с разнесенным приемом или с более высокими э. и. и. м. для фидерных линий РСС в целях борьбы с ослаблением сигнала в дожде в районах с сильными дождями приведет также к более высоким отношениям сигнал/помеха.

5. Заключение

Сосуществование фидерных линий РСС с фиксированными службами, использующими цифровую модуляцию, возможно при соблюдении действующего ограничения э. и. и. м. в 55 дБВт в соответствии со Статьей 27 Регламента радиосвязи. В наихудших условиях цифровая радиорелейная передача ФС на частотах около 18 ГГц, создающая помехи приемнику фидерной линии, будет вызывать максимальное ухудшение в 0,12 дБ в номинальном отношении C/N при приеме сигнала вещательного спутника в соответствии с Планом Района 2 (1983 г.). При этом предполагается, что э. и. и. м. фидерной линии составляет 86 дБВт, но не принимаются во внимание другие факторы, которые могли бы уменьшить влияние наземной помехи, такие как пространственная избирательность антенны фидерной линии и уменьшение спектральной плотности мощности из-за разности в ширине полосы частот каналов. Так как влияние наземной помехи считается несущественным, и учитывая, что дополнительные факторы могут еще уменьшить помеху, делается вывод, что нет необходимости иметь ограничения относительно направления максимального излучения антенн наземных радиорелейных линий, использующих цифровую модуляцию. Дополнительные факторы должны также обеспечить некоторое уменьшение э. и. и. м. фидерной линии, которое могло бы быть связано с Планом фидерных линий Районов 1 и 3 без превышения несущественных помех, рассчитанных выше, и по-прежнему без необходимости ограничений относительно направления максимального излучения антенн наземных радиорелейных линий.

ОТЧЕТ 393-4*

ПЕРЕСЕЧЕНИЯ АНТЕННЫХ ЛУЧЕЙ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ С ОРБИТАМИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ

(Вопросы 32/4 и 17/9)

(1966—1970—1974—1978—1990)

1. Введение

Направление антенных лучей радиорелейных систем на излучения от спутников связи геометрически предсказуемо, если спутники движутся по круговым орбитам, проекции которых на поверхность Земли повторяются (см. Отчет 206, § 2.2), но статистически предсказуемо только для наклонных круговых орбит с произвольными периодами. Фазированные системы с повторяющимися проекциями орбит спутников на поверхность Земли могут быть построены так, чтобы следовать по единой проекции, и интерес к таким системам возрастает. Геостационарные спутники представляют особый случай, поскольку экватор является проекцией движения спутников на всех экваториальных орбитах.

В любом месте на Земле, с которого можно наблюдать спутники с единой проекцией орбит на поверхность Земли, спутники (негеостационарные) будут двигаться на небосводе друг за другом по фиксированной дуге от одного края горизонта к другому. Кроме того, за исключением наклонных орбит, эта дуга не будет зависеть от долготы и будет симметрично расположена относительно оси север—юг.

В последующих разделах настоящего Отчета рассматриваются условия направления антенн относительно круговой экваториальной орбиты (включая особый случай, относящийся к орбите геостационарного спутника), а также вероятность направления на несфазированные спутники (при несовпадающих проекциях движения спутника на поверхность Земли).

Ряд администраций предоставили некоторые сведения относительно направленности существующих антенн радиорелейных систем на орбиту геостационарного спутника. Показано, что, хотя общий процент антенных лучей, пересекающих геостационарную орбиту, составляет примерно 2%, этот процент будет значительно выше, если учесть луч, простирающийся до $\pm 2^\circ$ относительно своей оси, и влияние рефракции. Проверка соответствия существующих радиорелейных станций Рекомендации 406 показывает, что в некоторых странах процент станций, имеющих направление основного луча антенны в пределах $\pm 2^\circ$ относительно геостационарной орбиты, составляет около 10%. Более того, невозможно предположить, что значительные сегменты орбиты в любом диапазоне долготы будут свободны от облучения антеннами радиорелейных систем.

2. Некоторые характеристики антенных лучей наземных радиорелейных систем

В радиорелейных системах прямой видимости используются антенны с усилением порядка 40 дБ и шириной луча по половинной мощности примерно 2° . В тропосферных системах обычно применяются антенны с большим усилением и более узкими лучами, скажем, 50 дБ и $0,5^\circ$. В любом случае наклонение трассы в среднем менее $0,5^\circ$ и редко превышает 5° . Когда все лучи с отрицательным наклоном падают на Землю, направления на орбиту будут отсутствовать. При направлении центра лучей на горизонт верхняя половина луча может быть направлена на орбиту.

Если используются пассивные отражатели, следует учитывать перелив излучения.

Поскольку лучи идут вдоль Земли и пересекают значительную толщу атмосферы, при точных расчетах направления следует принимать во внимание дифракцию и рефракцию.

* Администрации приглашаются представлять предложения для совершенствования модели влияния рефракции и результаты направлять в МККР.

3. Направления на круговые экваториальные орбиты

Из геометрии хорошо известно, что азимутальный угол A (измеряемый по часовой стрелке от севера) и угол места e спутника, движущегося по круговой экваториальной орбите, могут быть выражены как

$$A = \arctan (\pm \tan \lambda / \sin \varphi) , \quad (1)$$

$$e = \arcsin \left[(K \cos \varphi \cos \lambda - 1) / \sqrt{K^2 + 1 - 2K \cos \varphi \cos \lambda} \right] , \quad (2)$$

где

K : отношение радиуса орбиты к радиусу Земли;

φ : географическая широта наземной станции;

λ : разность по долготе между наземной станцией и спутником.

Исключение λ из этих уравнений приводит к выражению:

$$A = \arccos \left\{ \left[\frac{\tan e + K^{-1} \sqrt{\tan^2 e + (1 - K^{-2})}}{1 - K^{-2}} \right] \tan \varphi \right\} . \quad (3)$$

В случае необходимости путем расширения этого анализа могут быть определены азимуты и углы места к любой системе с наклонной орбитой и единой проекцией движения спутника на поверхность Земли данной высоты, наклонения и точки пересечения экватора. Однако в таких системах направление на орбиту будет зависеть от широты и долготы наземной станции.

Очевидно, что на антенну, направленную на орбиту негеостационарного спутника (или на другую орбиту с такой же проекцией движения спутника на поверхность Земли), будет воздействовать прерывистое излучение. При m спутников на круговой экваториальной орбите (отличающейся от орбиты геостационарного спутника) антенны, имеющие ширину диаграммы θ радиан и направленные в сторону помех, будут испытывать помехи в течение некоторой доли времени, приблизительно определяемой выражением:

$$P = m \theta / (2 \pi) . \quad (4)$$

В особом случае орбиты геостационарного спутника P будет равно нулю или единице.

4. Несфазированные системы спутников

В этом случае можно вывести только среднюю вероятность направления на спутник. Таким образом, для системы, имеющей n орбит с одинаковой высотой и одинаковым углом наклонения i , можно показать, что средняя вероятность направления определяется уравнением:

$$P = [m n \theta / (8 \pi \cos \Psi)] \left\{ \arccos [(\sin (\Psi - \theta/2)) / \sin i] - \arccos [(\sin (\Psi + \theta/2)) / \sin i] \right\} , \quad (5)$$

когда $\Psi \leq (i - \theta/2)$

и где

m : число спутников на каждой орбите;

Ψ : широта точки пересечения луча антенны с орбитальной сферой.

Как указано в работе [Арешев и Калашников, 1974], в большинстве случаев на практике, когда $i > \theta$, расчеты могут быть выполнены с помощью формулы:

$$P = \frac{m n \theta^2}{8 \pi \sqrt{\sin^2 i - \sin^2 \Psi}} . \quad (6)$$

Относительная ошибка в расчетах по формуле (6) не превышает 0,25% ошибок в расчетах по формуле (5).

Для частного случая полярной орбиты $i = \pi/2$, и приведенное выше выражение принимает вид:

$$P = m n \theta^2 / (8 \pi \cos \Psi) . \quad (7)$$

5. Геометрические соотношения между направлениями антенн радиорелейных систем и орбитой геостационарного спутника

Рассмотрение геостационарной орбиты представляет особую важность не только с точки зрения направления антенн радиорелейных систем на лучи от спутников, но также в связи с ограничениями, накладываемыми Рекомендацией 406 на направления антенн радиорелейных систем, чтобы защитить прием, осуществляемый геостационарными спутниками.

Уравнение (3) может быть представлено как:

$$A = \arccos \frac{\tan \varphi}{\tan [\arccos (K^{-1} \cos e) - e]}, \quad (8)$$

где

- A : азимутальный угол (или его дополнение до 360°), измеряемый с юга в северном полушарии и с севера в южном полушарии;
- K : отношение радиуса орбиты к радиусу Земли, предполагаемое равным 6,63;
- e : геометрический угол места точки на геостационарной орбите;
- φ : широта наземной станции.

Для данной широты станции и данного угла места значения азимутального угла A для двух точек орбиты измеряются с обеих сторон меридиана.

Уравнение (8) использовано для составления шкалы, представленной на рис. 1а и 1б, с помощью которой можно определить направление геостационарных орбит для широт приблизительно между 0 и 70° . В таблице I даны азимутальные углы для точек орбиты с углом места 0° .

5.1 Влияние атмосферной рефракции

Обычно влияние атмосферной рефракции проявляется в том, что луч радиоволнового излучения отклоняется к Земле; луч антенны радиорелейной системы с углом места ϵ может достигнуть спутника с углом места e при:

$$e = \epsilon - \tau, \quad (9)$$

где e и ϵ — алгебраические величины, а τ — абсолютное значение поправки на рефракцию.

Степень отклонения луча зависит от климатических условий региона, в котором расположена станция (индекса рефракции, градиента индекса атмосферной рефракции и т. д.), высоты, на которой расположена станция, и первоначального угла места ϵ ; изменение τ в зависимости от ϵ происходит особенно быстро при малых отрицательных значениях ϵ .

Значение τ может быть больше нескольких десятых градуса, и это особенно важно для станций, расположенных в средних и высоких широтах, где небольшое изменение угла места приводит к значительным изменениям азимута по отношению к двум соответствующим точкам на геостационарной орбите. Кроме того, эта поправка изменяется во времени в зависимости от атмосферных условий. Для данной точки широты и для данного угла места азимут к орбите будет изменяться во времени в определенной угловой зоне.

Тогда как средняя величина рефракции будет обеспечивать существенную защиту, для применения Рекомендации 406 с целью обеспечения полной защиты желательно рассмотреть максимальную и минимальную величину изгибания луча, чтобы определить азимуты границ этой угловой зоны. Это может быть выполнено на статистической основе. Для определения азимутов границ угловой зоны на основе экстремальных значений углов места e_1 и e_2 можно использовать рис. 1а и 1б.

Не всегда можно легко определить отклонение τ в зависимости от климатических условий, высоты расположения станции и угла места ϵ , поскольку не всегда применимо допущение эталонной атмосферы экспоненциального типа (см. Отчет 720), и ни в коем случае нельзя пренебрегать вероятностью образования атмосферных волноводов, особенно в определенных районах с жарким морским климатом. Некоторая информация по этой проблеме содержится в Отчете 720.

Если может быть приемлема гипотетическая атмосфера экспоненциального типа и если взаимосвязаны приземный индекс рефракции N_S и градиент индекса рефракции ΔN в пределах от 0 до 1000 м, то можно рассчитывать кривые поправки τ в зависимости от угла места ε . В Отчете 563 на рис. 4—7 дана полезная информация о значениях ΔN , соответствующих различным географическим зонам; в Отчете 238 даны характеристики различных типов климата. Определение максимальной и минимальной поправок τ_1 и τ_2 эквивалентно тогда оценке максимальных и минимальных значений N (или ΔN) для рассматриваемого конкретного случая.

Очень трудно оценить влияние высоты расположения станции. Если углы места положительные, то радиолуч быстро проходит через атмосферу, отклонение τ относительно небольшое и влияние высоты расположения станции, вероятно, уменьшается. С другой стороны, если углы места отрицательные, то луч, пересекающий горизонт, дважды проходит через самые плотные слои атмосферы; таким образом, отклонение τ становится более значительным и изменение его значений в зависимости от высоты при постоянном угле места также, вероятно, будет значительно больше. Однако подтверждающих это точных данных нет.

Для обеспечения защиты во всех условиях необходимо предварительно принять следующие правила:

5.1.1 в тех географических зонах, где имеются данные о распространении, которые дадут возможность определить степень отклонения на статистической основе, максимальное отклонение (например, отклонение, не превышаемое в течение 99,5% времени) и минимальное отклонение должны выводиться с помощью этих данных;

5.1.2 если таких данных нет, то можно использовать следующую аппроксимацию. Можно рассчитать предельные значения индекса рефракции для экспоненциальной эталонной атмосферы на основе индекса рефракции радиоизлучения на уровне моря N_0 и градиента ΔN (которое можно найти в таблицах всемирных данных). На рис. 2 и 3 в Отчете 563 можно заметить, что значения N_0 между 250 и 400 (и, соответственно, ΔN на уровне моря между -30 и -68) представляют собой минимальные и максимальные значения, наиболее характерные для большей части мира в течение года. Установление этих пределов позволяет рассчитать кривые для τ_1 и τ_2 в зависимости от угла места антенны и высоты станции. Такие кривые представлены на рис. 2. Эта информация альтернативно представлена в приложении I к настоящему Отчету в виде численных формул, удобных для компьютерной реализации.

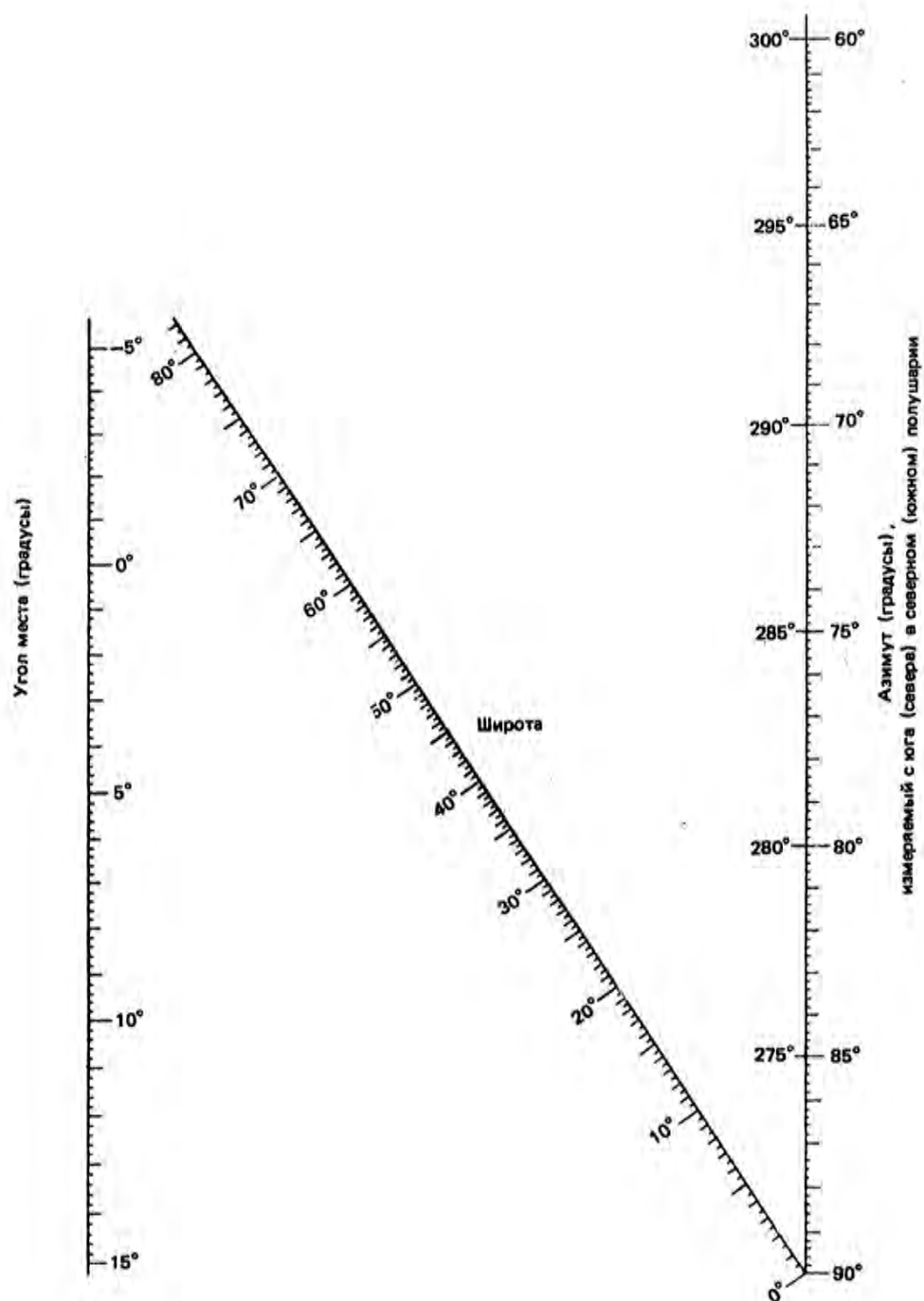


РИСУНОК 1а — Определение направления на геостационарную орбиту — низкие и средние широты

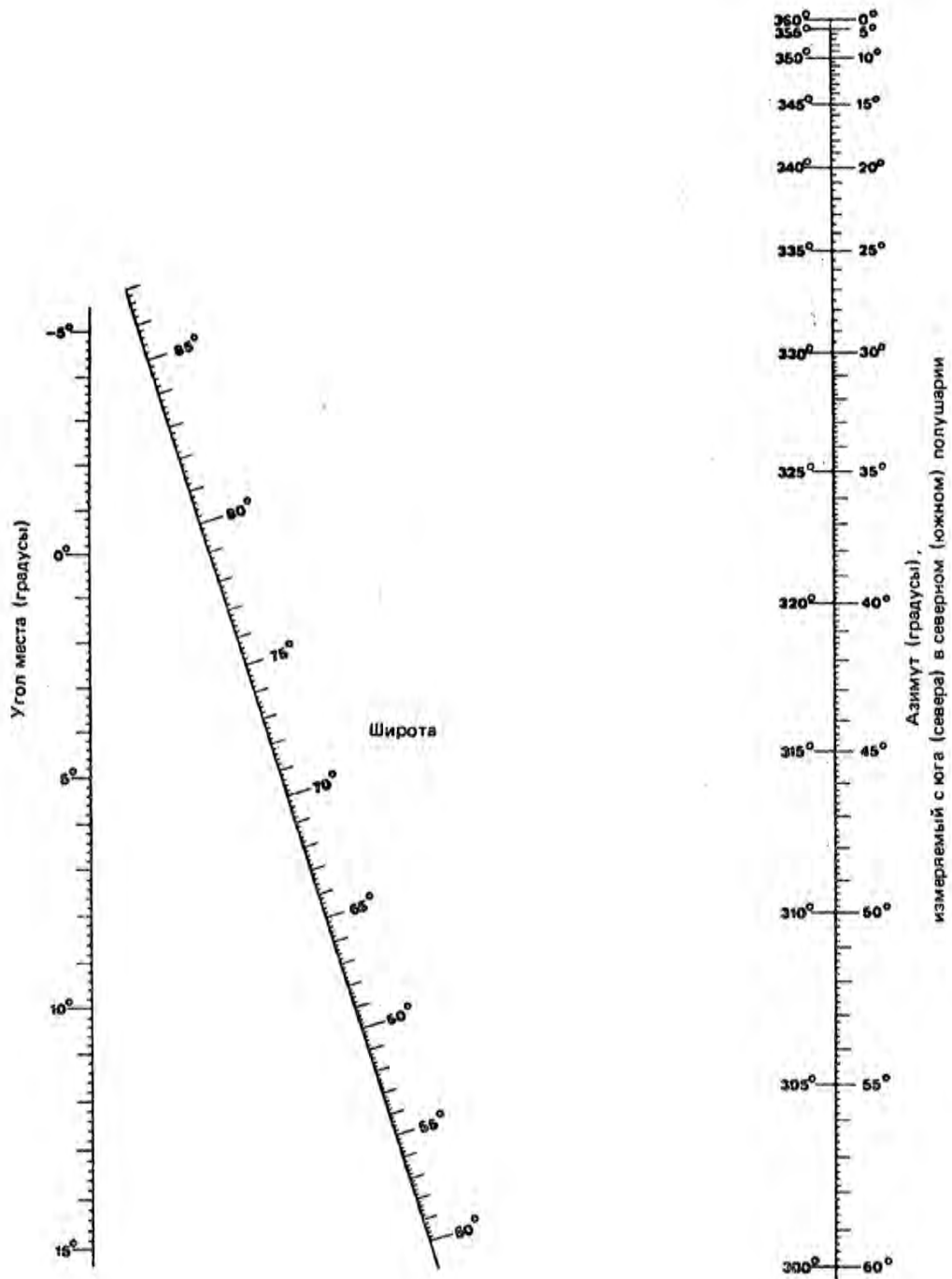


РИСУНОК 1b — Определение направления на геостационарную орбиту — высокие широты

ТАБЛИЦА I — Азимуты при угле места 0° точек на орбите геостационарного спутника

Широта	Азимут	Широта	Азимут	Широта	Азимут
0,00	90,00	24,00	86,11	48,00	80,24
1,00	89,85	25,00	85,92	49,00	79,89
2,00	89,69	26,00	85,73	50,00	79,52
3,00	89,54	27,00	85,54	51,00	79,14
4,00	89,39	28,00	85,35	52,00	78,74
5,00	89,24	29,00	85,15	53,00	78,32
6,00	89,08	30,00	84,95	54,00	77,88
7,00	88,93	31,00	84,74	55,00	77,42
8,00	88,77	32,00	84,53	56,00	76,93
9,00	88,62	33,00	84,31	57,00	76,41
10,00	88,46	34,00	84,09	58,00	75,87
11,00	88,30	35,00	83,87	59,00	75,29
12,00	88,14	36,00	83,64	60,00	74,68
13,00	87,98	37,00	83,40	61,00	74,02
14,00	87,82	38,00	83,15	62,00	73,33
15,00	87,66	39,00	82,90	63,00	72,58
16,00	87,49	40,00	82,65	64,00	71,77
17,00	87,33	41,00	82,38	65,00	70,90
18,00	87,16	42,00	82,10	66,00	69,96
19,00	86,99	43,00	81,82	67,00	68,94
20,00	86,82	44,00	81,53	68,00	67,82
21,00	86,64	45,00	81,22	69,00	66,58
22,00	86,47	46,00	80,91	70,00	65,22
23,00	86,29	47,00	80,58		

Примечание.— Азимуты (или их дополнения до 360°) рассчитаны относительно меридиана места расположения станции в направлении экватора (к югу в северном полушарии, к северу в южном полушарии).

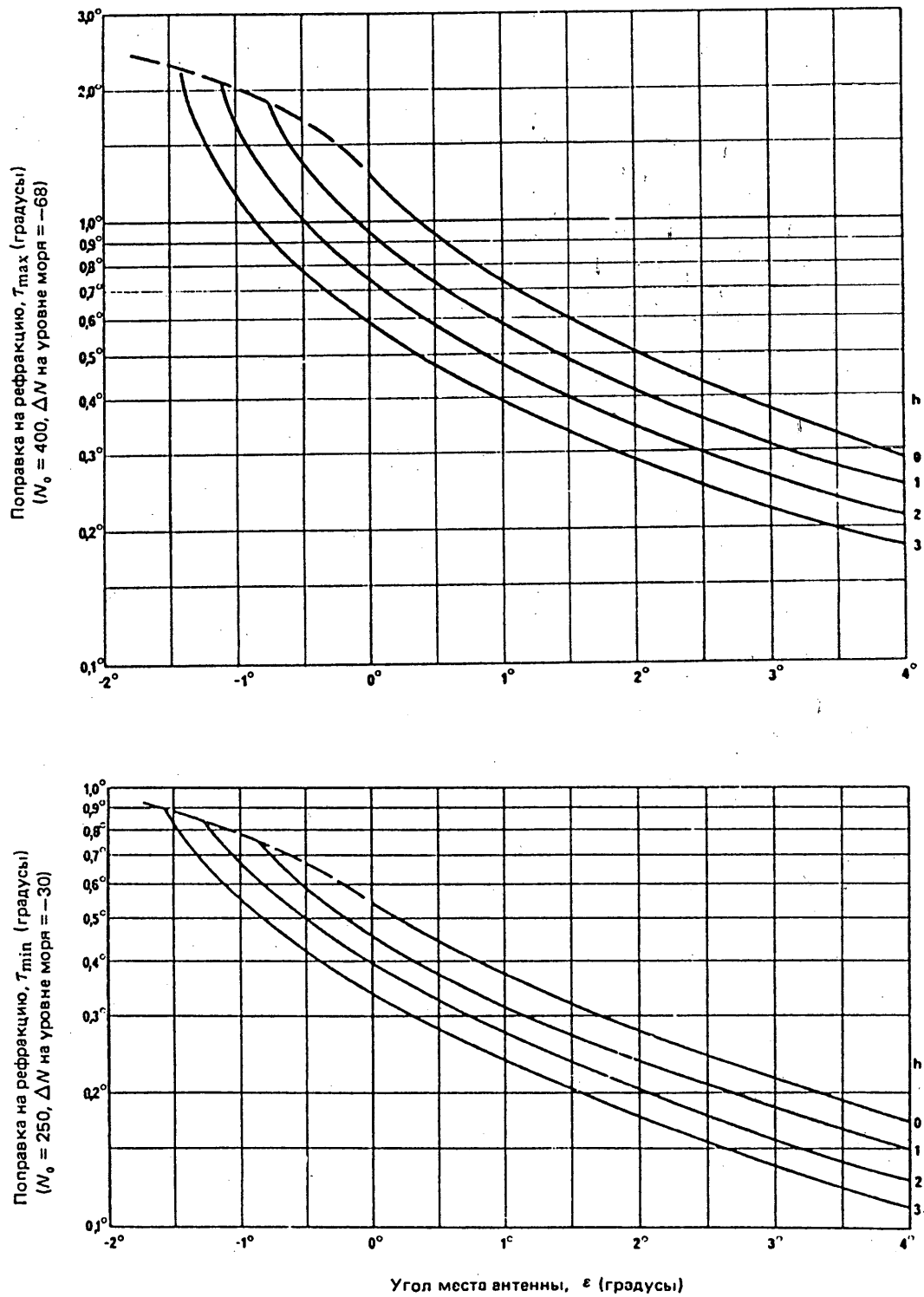


РИСУНОК 2 — Поправка на рефракцию для угла места ε

h : высота антенны над средним уровнем моря (км)

На основании *CRPL Exponential Reference Atmosphere*, Bean & Thayer, NBS Monograph 4, U. S. Dept. of Commerce (1959)

5.2 Угловое отклонение между лучом антенны и орбитой геостационарного спутника

Когда определена угловая зона, указывающая направления антенны точно на орбиту (функция изменения во времени влияния рефракции), к обеим границам этой зоны должно быть добавлено определенное азимутальное отклонение, чтобы уверенно определить данное угловое отклонение между направлением луча антенны радиорелейной станции и орбитой геостационарного спутника.

С помощью рис. 3 можно быстро определить азимуты, которые могут находиться в пределах критической зоны для предложенной радиорелейной станции с углом места антенны от $+3^\circ$ до -1° , расположенной в регионах, где применимо допущение экспоненциальной атмосферы при N_0 между 250 и 400 (и, соответственно, ΔN на уровне моря между -30 и -68). Если предложенный азимут трассы не расположен между кривыми А и В, то здесь помехи не возникнут и, следовательно, этот азимут будет удовлетворительным. Кривые на рис. 3 могут использоваться с точностью примерно до $\pm 0,5^\circ$.

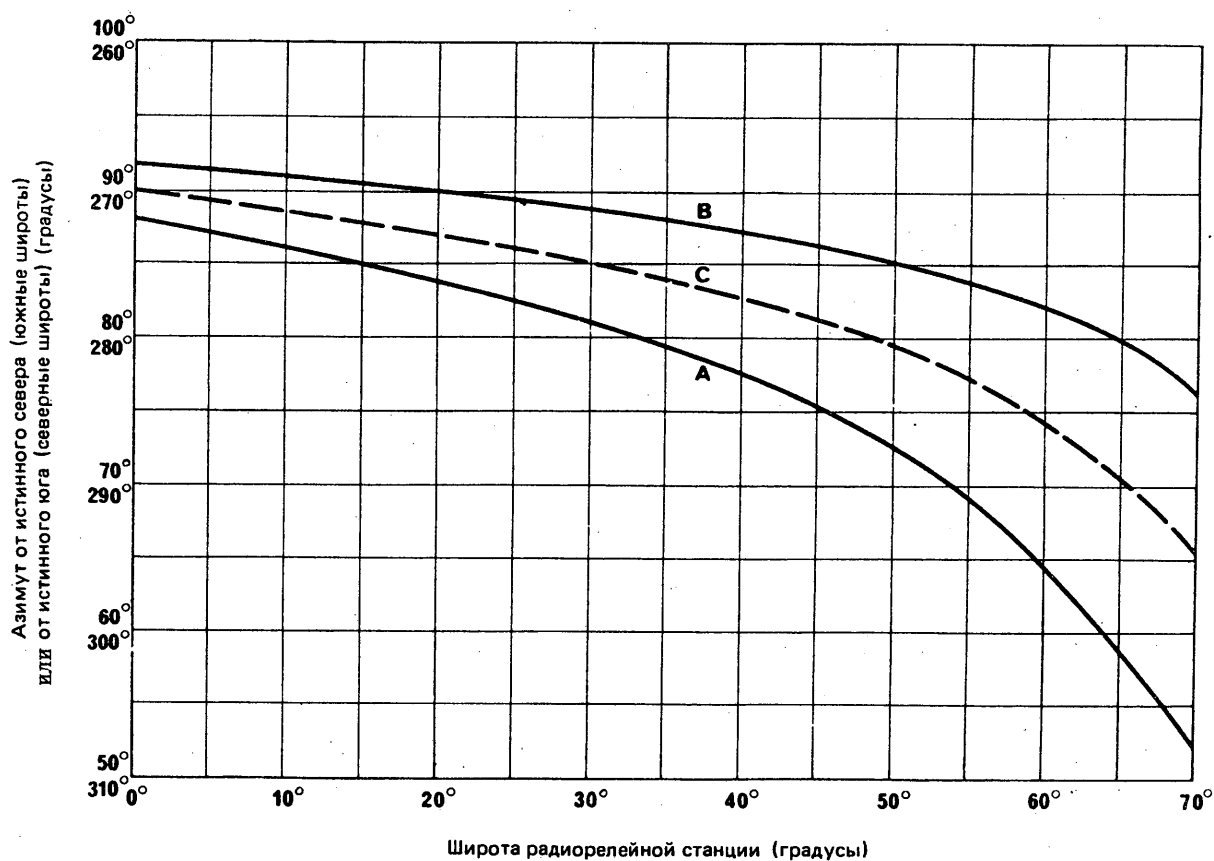


РИСУНОК 3 — Диаграмма защиты для азимутов, которых следует избегать на радиорелейных станциях

Кривые А: разнесение 2° для угла места $+3^\circ$, предполагая $\tau_{\min}$ ($N_0=250$, ΔN на уровне моря $= -30$, $h=0$)
 В: разнесение 2° для угла места -1° , предполагая $\tau_{\max}$ ($N_0=400$, ΔN на уровне моря $= -68$, $h=1,5$ км)
 С: угол места 0° , рефракция отсутствует (из таблицы I)

Если предложенный азимут трассы попадает между кривыми А и В, изображенными на рис. 3, или если необходимо использовать другие значения N_0 , или если предложенный угол места не находится между $+3^\circ$ и -1° , тогда необходимо выполнить дополнительные расчеты. Для многих случаев, которые не охватывает рис. 3, можно использовать рис. 4, чтобы определить азимутальные отклонения на обеих границах центральной угловой зоны. Кривые характеризуют защиту $0,5^\circ$, $1,5^\circ$ и 2° , а другие значения могут быть интерполированы. Кривые А, В и С указывают отклонение в направлении к меридиану, а кривые D, E и F — от меридиана. Предполагалось, что наземный горизонт ровный и имеет такой же угол места, как у антенны; таким образом, кривые D, E и F параллельны горизонтальной оси на уровне, соответственно, $0,5^\circ$, $1,5^\circ$ и 2° .

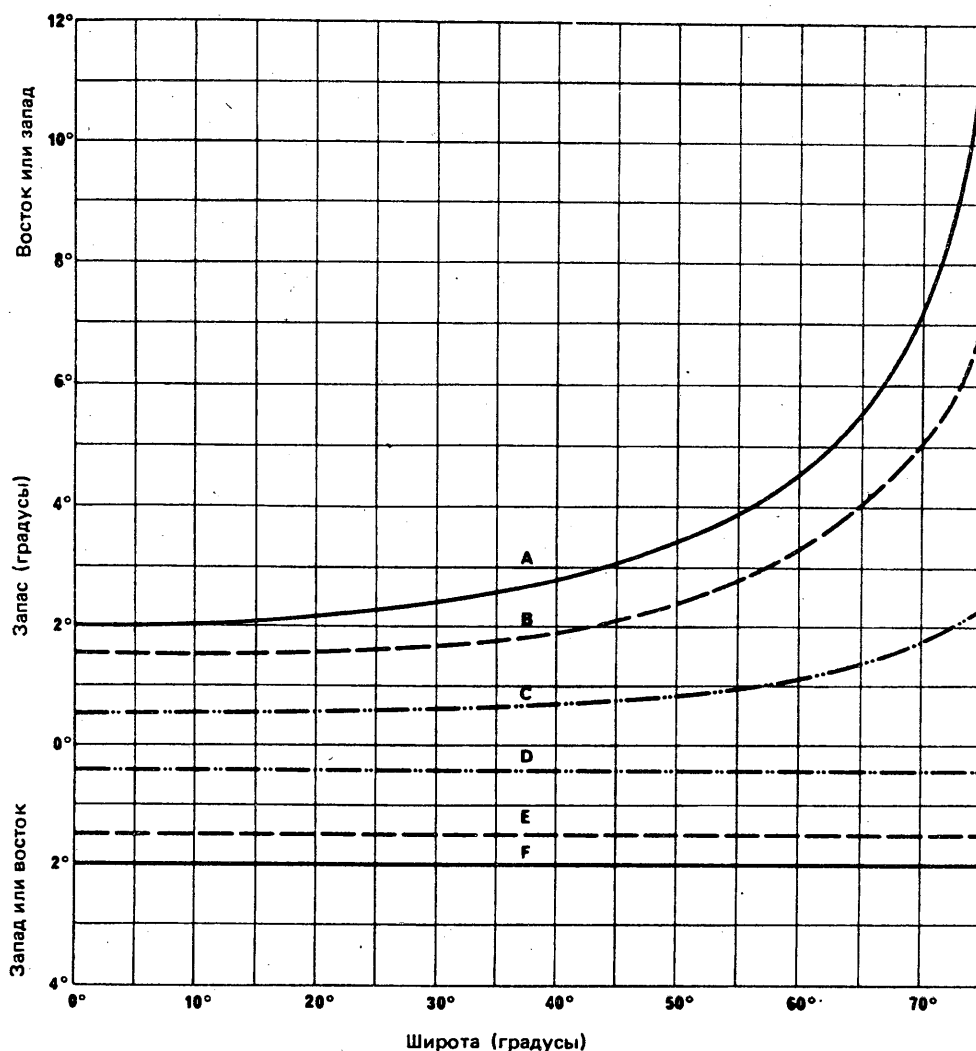
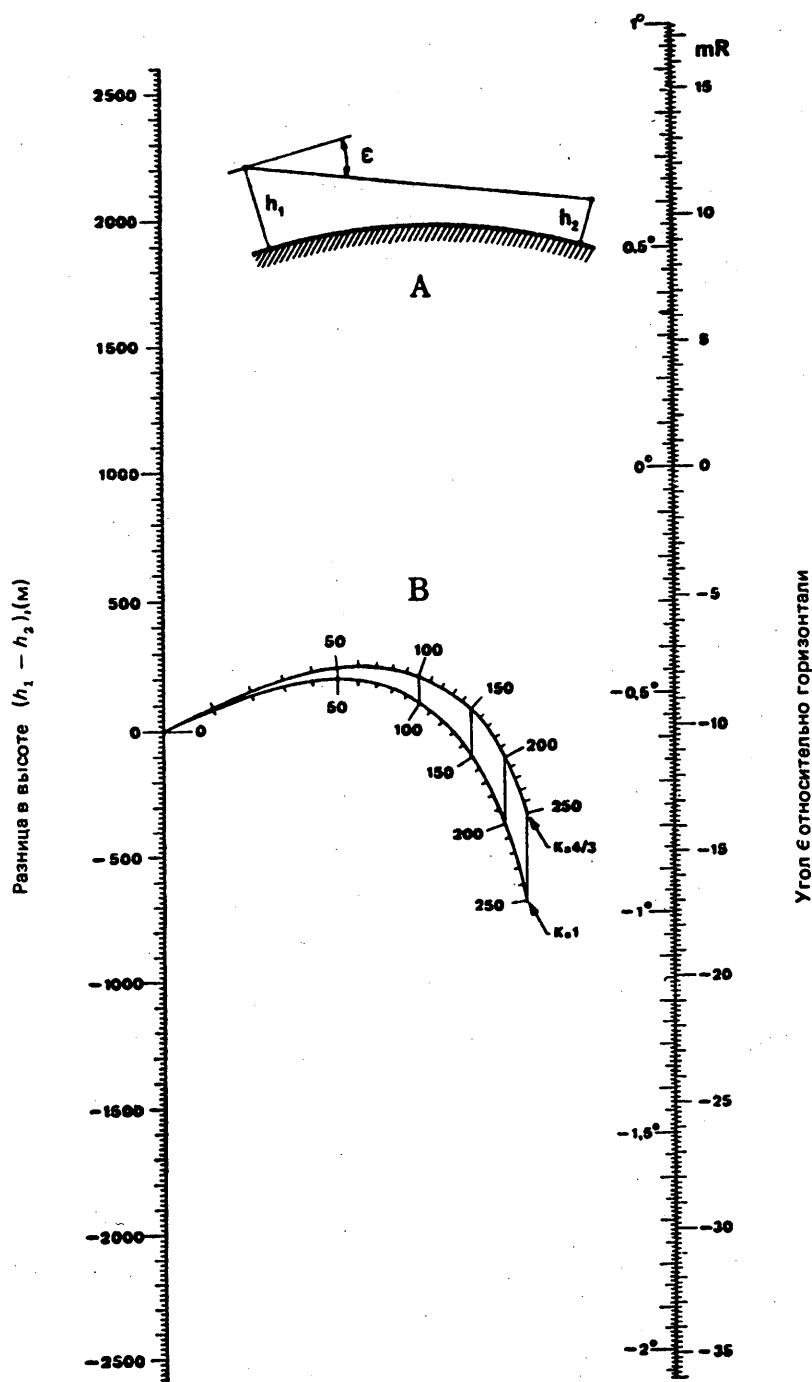


РИСУНОК 4 — Азимутальные запасы (в градусах) между основным направлением антенны радиорелейной системы и направлением на орбиту геостационарного спутника, позволяющие получить защиту $0,5^\circ$, $1,5^\circ$ или 2°

Кривые А: защита 2° ; к меридиану
 В: защита $1,5^\circ$; к меридиану
 С: защита $0,5^\circ$; к меридиану
 D: защита $0,5^\circ$; от меридиана
 E: защита $1,5^\circ$; от меридиана
 F: защита 2° ; от меридиана

При планировании нового участка радиорелейной системы можно быстро определить степень ограничения наведения ее антенн в соответствии с Рекомендацией 406 (см. рис. 8). Можно использовать рис. 5 для определения угла места ϵ передающей антенны в зависимости от разности высот передающей и приемной антенн и длины участка. Определив поправку на рефракцию в соответствии с пунктом 5.1, можно использовать рис. 1 для установления экстремальных азимутов угловой зоны в зависимости от экстремальных углов места e_1 и e_2 . Рис. 4 можно использовать для определения такой полосы, которая должна быть добавлена к центральному азимуту с той и другой стороны для получения необходимого угла защиты орбиты.



Азимутальная полоса фактически зависит от широты расположения станции и от угла места антенны. Выполняя первоначальные приблизительные расчеты для нужных углов места, можно не учитывать влияние самой величины углов места, так как любая ошибка вследствие этого будет чрезвычайно мала по сравнению с поправкой, которая должна быть введена для учета влияния рефракции. (Это приводит к тому, что орбита на каком-то участке приближается к прямой линии.)

Однако если имеются какие-то сомнения или рассматриваются особые географические условия, необходимо более детальное изучение влияния горизонта, которое описывается в следующем разделе.

5.3 Использование графического метода для более детального определения азимутов, которых следует избегать

С помощью графического метода, описанного в работе [Gould, 1967], учитывается влияние фактического местного горизонта. Аппроксимация ограничивает его применение к станциям, расположенным на широте ниже примерно 70° . Точность определения азимута этим методом составляет приблизительно $0,1^\circ$ и выше, чем для малых углов места.

Метод, проиллюстрированный на рис. 6, основан на рассмотрении кажущейся орбиты геостационарного спутника с учетом влияния рефракции, широты расположения наземной станции, угла места антенны и влияния местного оптического (реального) горизонта.

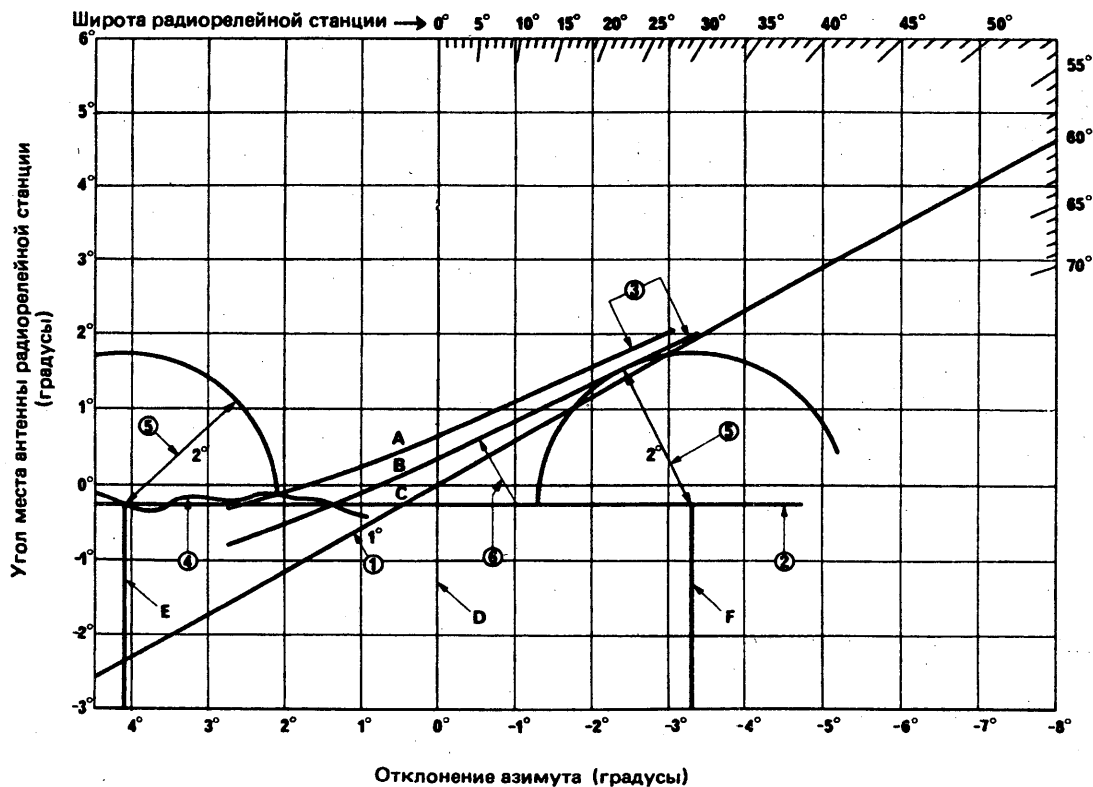


РИСУНОК 6 — Пример использования графического метода

Высота радиорелейной станции: 1 км
 Широта: 60°
 Угол места ε : $-0,25^\circ$

A: максимальная рефракция
 B: минимальная рефракция
 C: без рефракции

D: эталонный азимут $74,68^\circ$ (из таблицы I)
 E: верхний предел $74,68^\circ + 4,1^\circ = 78,78^\circ$
 F: нижний предел $74,68^\circ - 3,3^\circ = 71,38^\circ$

Порядок определения:

1. Построить проекцию орбиты, проведя линию между центром графика и широтой расположения радиорелейной станции.
2. Провести горизонтальную линию на уровне предлагаемого угла места луча антенны.
3. Поднять эту проекцию с учетом рефракции. Постройте кривые для ожидаемых минимальной и максимальной рефракций.
4. Изобразить оптический горизонт для нужного района.
5. С помощью транспортира или линейки найти две точки на линии возвышения луча, которые отстоят на два градуса от ближайших точек наклонной проекции орбиты на том ее участке, который находится над оптическим горизонтом.

Чтобы построить кажущуюся (подверженную рефракции) орбиту, необходимо поднять проекцию геометрической орбиты в каждой точке на величину τ , которая зависит от угла места геометрической орбиты и высоты станции, как показано на рис. 7. Этот рисунок построен на основе рис. 2 с помощью уравнения (9), следовательно, ограничения, приведенные в конце пункта 5.1, также применимы к рис. 7.

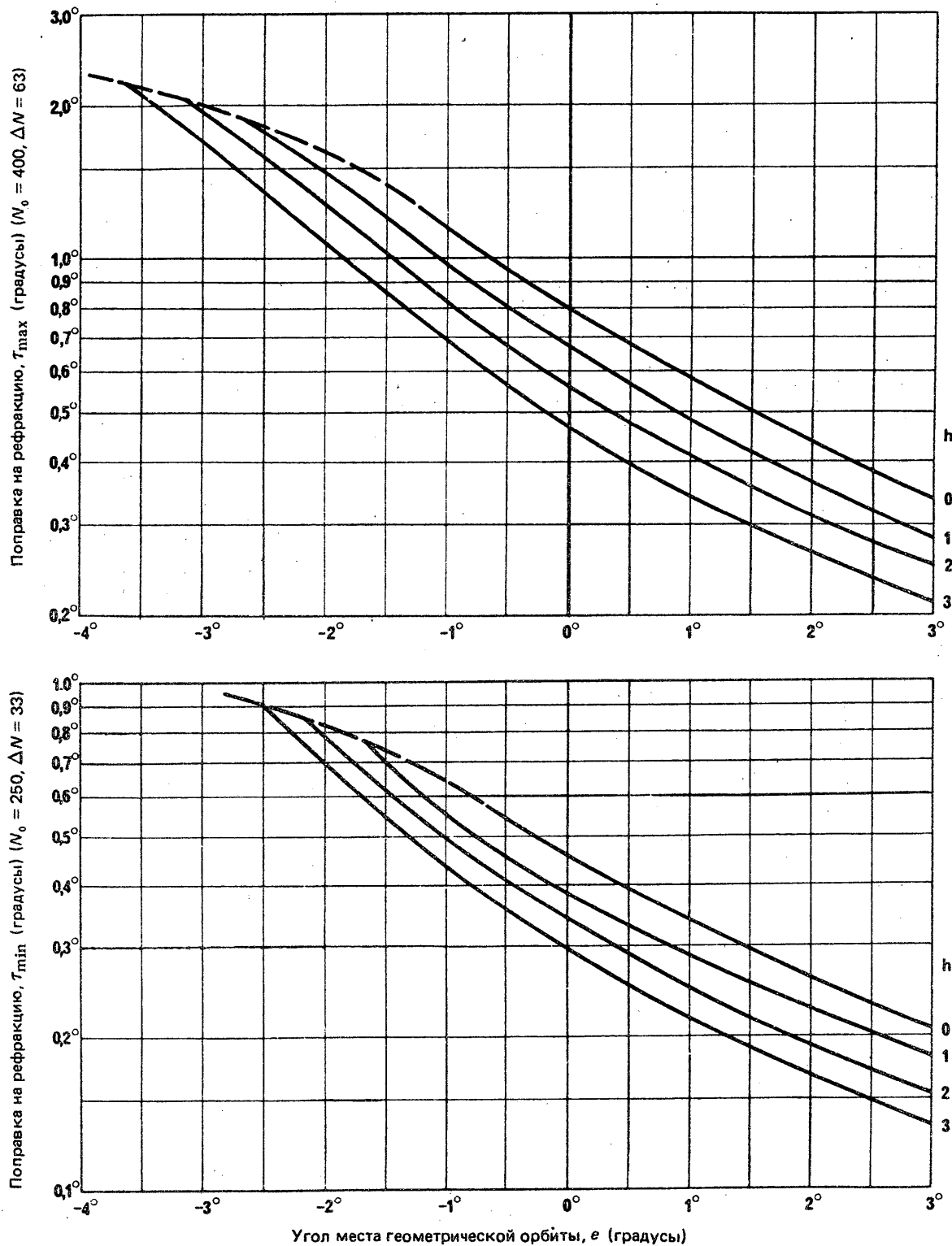


РИСУНОК 7 — Поправка на рефракцию для угла e

h : высота антенны над средним уровнем моря (км)

Данный метод можно обобщить следующим образом:

5.3.1 На рис. 6 проведите прямую линию через начало координат и точку, соответствующую широте определенной станции. (При этом подразумевается приближенное изображение орбиты в виде прямой линии для данного небольшого района.) Эталонный азимут (0° на рис. 6) для нулевого геометрического угла места приводится в таблице I или на рис. 1a или 1b.

5.3.2 Проведите горизонтальную линию, соответствующую углу места ϵ , планируемому для антенны. Этот угол может быть определен с помощью рис. 5.

5.3.3 Поднимите проекцию геометрической орбиты в каждой точке на величину τ (которая зависит от e), чтобы учесть ожидаемые минимальную и максимальную рефракции. Это означает, что будут построены две новые проекции, одна соответствует минимальному отклонению луча, а другая — максимальному.

5.3.4 Проведите линию местного горизонта в районе нужного азимута. Для предварительных исследований метод может быть упрощен путем замены линии реального местного горизонта на линию среднего приблизительного горизонта.

5.3.5 Используя транспортир, проведите радиус под углом 2° и найдите на прямой линии, обозначающей постоянный угол места антенны, центр окружности, касательной к проекции, соответствующей минимальному отклонению; таким образом определяем один из пределов азимута. Отнимите это отклонение азимута от центрального азимута, определенного по таблице I или по рис. 1a и 1b.

Аналогичным образом на прямой линии, обозначающей постоянный угол места антенны, найдите центр второй окружности так, чтобы ближайшая точка ее пересечения с проекцией максимального отклонения находилась над горизонтом; таким образом определяем второй предел азимута. Прибавьте это отклонение азимута к центральному азимуту.

5.3.6 Такое графическое построение может также использоваться для нахождения фактического углового разнеса между существующим азимутом антенны и орбитой; это будет показание транспортира, соответствующее самому короткому расстоянию между точкой направления антенны, находящейся на линии, обозначающей угол места луча антенны ϵ , и ближайшей проекцией орбиты. Затем можно использовать рис. 8 для определения максимальной излучаемой мощности, допускаемой в соответствии с Рекомендацией 406.

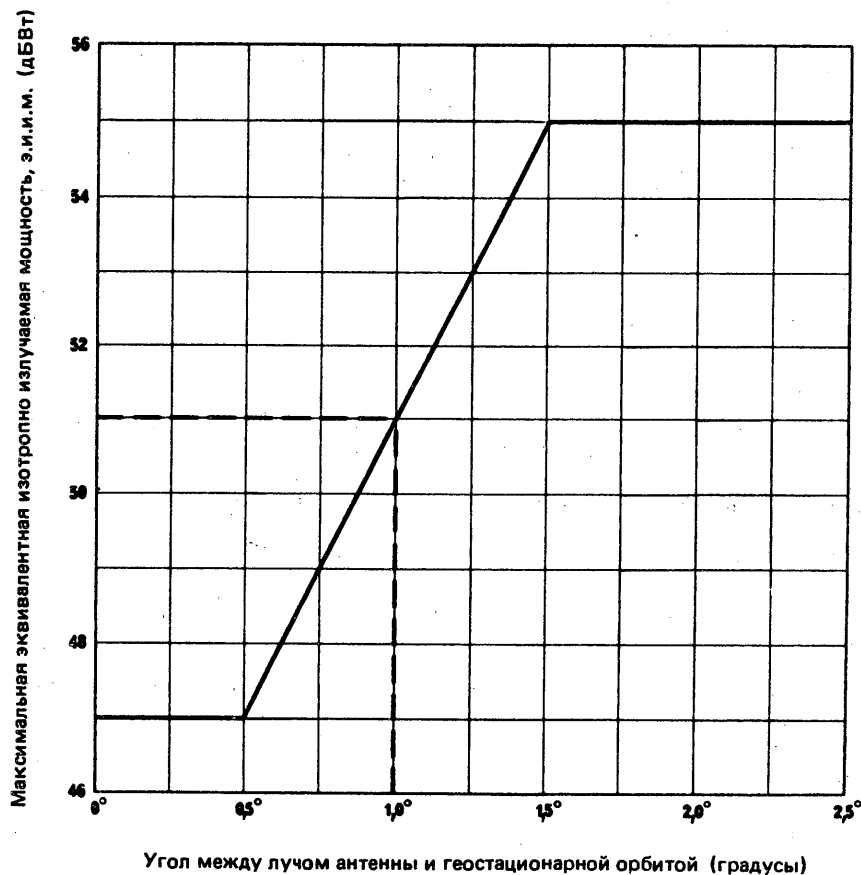


РИСУНОК 8 — Максимальная э.и.м., допускаемая в соответствии с Рекомендацией 406

— — — пример

5.4 Аналитические методы

Для станций, расположенных на широтах между 70 и 81° (граница зоны, покрываемой геостационарным спутником), различные графические аппроксимации уже неприменимы, и должны использоваться аналитические методы. Такие методы полезны для быстрого исследования большого числа радиорелейных станций, поскольку они очень удобны для использования компьютеров. Один из таких методов описан в статье [Lundgren и May, 1969].

Если известно распределение индекса рефракции, то с помощью аналитического метода, описанного в документе [МККР, 1966-69], могут быть также определены азимутальные направления, которых следует избегать. Такие расчеты дают ряд таблиц, представляющих зависимость азимутальных направлений, которых следует избегать, от широты радиорелейной станции и угла места луча ее антенны. Пример таких таблиц приведен в документе [МККР, 1966-69]. Эти таблицы облегчают работу по нахождению направлений лучей радиорелейных станций на геостационарную орбиту.

Несколькими администрациями разработаны компьютерные программы [FCC, 1972; CNET, 1973; Канада, 1972; Япония, 1989] и МКРЧ, 1989. Эти программы позволяют рассчитать направления, которых следует избегать, и угол между направлением основного луча антенны радиорелейной станции и геостационарной орбитой.

В приложениях II и III к настоящему Отчету описаны два альтернативных аналитических метода расчета. Оба метода сейчас используются разными администрациями, и в МККР можно получить их программные реализации для ЭВМ. Результаты расчетов по двум методам несколько отличаются друг от друга, поскольку они основаны на разных толкованиях критериев избежания направления на орбиту, приведенных в Рекомендации 406-5. Оба метода сохраняются на следующий исследовательский период, чтобы дать возможность администрациям продолжить их оценку и определить, какой из них более целесообразен.

В МККР [1986—1990] описан метод, расширенный по сравнению с тем, который изложен в приложении II и в большей степени учитывающий влияние рефракции.

ССЫЛКИ

- АРЕШЕВ М. С. и КАЛАШНИКОВ Н. И. [январь 1974] Средняя вероятность облучения неподвижной антенны наземной станции системой круговых несфазированных ИСЗ. *Радиотехника*, том 29, I.
- CNET (France) [1973] Département EFT. Programme de calcul EFT 003A. Protection de l'orbite des satellites géostationnaires.
- FCC [August 1972] Federal Communications Commission USA. Report CC-7201, USA.
- GOULD, R. G. [1967] Protection of the stationary satellite orbit. *Telecomm. J.*, Vol. 34, 8 (August 1967) and corrigendum (November 1967).
- LUNDGREN, C. W. and MAY, A. S. [December 1969] Radio-relay antenna pointing for controlled interference with geostationary satellites. *BSTJ*, Vol. 48, 10, 3387—3422.

Документы МККР

- [1966-69]: IX/207 (Япония);
- [1986—1990]: 4/315—9/322 (Канада).

ЛИТЕРАТУРА

- BEAN, B. R. [March 1962] The radio refractive index of air. *Proc. IRE*, Vol. 50, 3, 260—273.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ЧИСЛЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ИСКРИВЛЕНИЯ ЛУЧЕЙ АНТЕНН
РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СТАНЦИЙ В АТМОСФЕРЕ ИЗ-ЗА РЕФРАКЦИИ

Атмосферное искривление, или поправка на рефракцию τ , может быть оценена как функция угла места антенны ε и высоты станции h путем математического интегрирования на основе экспоненциальной модели атмосферной рефракции.

Численные формулы были получены, как изложено ниже, для моделей, описанных в Дополнениях 1 и 2. Диапазон аппроксимации был увеличен до $\varepsilon_m \leq \varepsilon \leq 8^\circ$ и $0 \leq h \leq 4$ км, чтобы расширить применимость формул. Нижний предел ε_m равен углу места, при котором луч только касается поверхности на уровне моря. Кроме того, формулы были оптимизированы на основе подхода однородной аппроксимации.

ε_m можно рассчитать с помощью выражения, приведенного в примечании 1 приложения III, при условии $h_1 = 0$.

Администрации приглашаются выразить свое мнение о том, какой из следующих далее наборов формул больше подходит для расчета разделяющих углов.

А. Численные формулы, подходящие для моделей, описанных в Дополнении 1

$$\tau_{\max}(\varepsilon, h) = 1 / [0,7885809 + 0,175963 h + 0,0251620 h^2 + \varepsilon (0,549056 + 0,0744484 h + 0,0101650 h^2) + \varepsilon^2 (0,0187029 + 0,0143814 h)] \quad (10)$$

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

В. Численные формулы, подходящие для моделей, описанных в Дополнении 2

$$\tau_{\max}(\varepsilon, h) = 1 / [0,7749897 + 0,304357 h + \varepsilon (0,590204 + 0,0643342 h) + \varepsilon^2 (-0,0714315 + 0,0309578 h) + \varepsilon^3 (0,0582357 - 0,00398046 h) - 0,0128241 \varepsilon^4 + 0,000876608 \varepsilon^5] \quad (12)$$

$$\tau_{\min}(\varepsilon, h) = 1 / [1,794805 + 0,389114 h + \varepsilon (0,888871 + 0,112098 h) + \varepsilon^2 (0,0111930 + 0,0119204 h)] \quad (13)$$

Примечание. — Вероятно, из-за сложных предположений, касающихся модели рефракции, принятой в Дополнении 2, для удовлетворительной аппроксимации $\tau_{\max}(\varepsilon, h)$ требуется больше членов, как показано выше.

ДОПОЛНЕНИЕ 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПОПРАВКИ НА РЕФРАКЦИЮ

Согласно ссылке, ниже, поправку на рефракцию можно рассчитать путем интегрирования:

$$\tau = - \int_{n_1}^{n_2} \left[\cot \varepsilon / n(r) \right] dn . \quad (14)$$

Интегрирование проводится в соответствии со следующим ниже условием закона Снелла для полярных координат:

$$n(r) \cdot r \cdot \cos \varepsilon = n(r_1) \cdot r_1 \cdot \cos \varepsilon_1 , \quad (15)$$

где

$$n(r) = 1 + a \cdot \exp \left[-b(r - r_0) \right] ;$$

r_0 : радиус Земли (6370 км);

$r_1 = r_0 + h$ (h — высота станции);

ε_1 : угол места на станции;

n_1 : индекс рефракции на высоте станции;

n_2 : индекс рефракции на орбите;

$$a = N_0 \cdot 10^{-6} ;$$

$$b = \ln \left[N_0 / (N_0 + \Delta N) \right] ;$$

$N_0 = 400$ и $\Delta N = -68$ при максимальном искривлении;

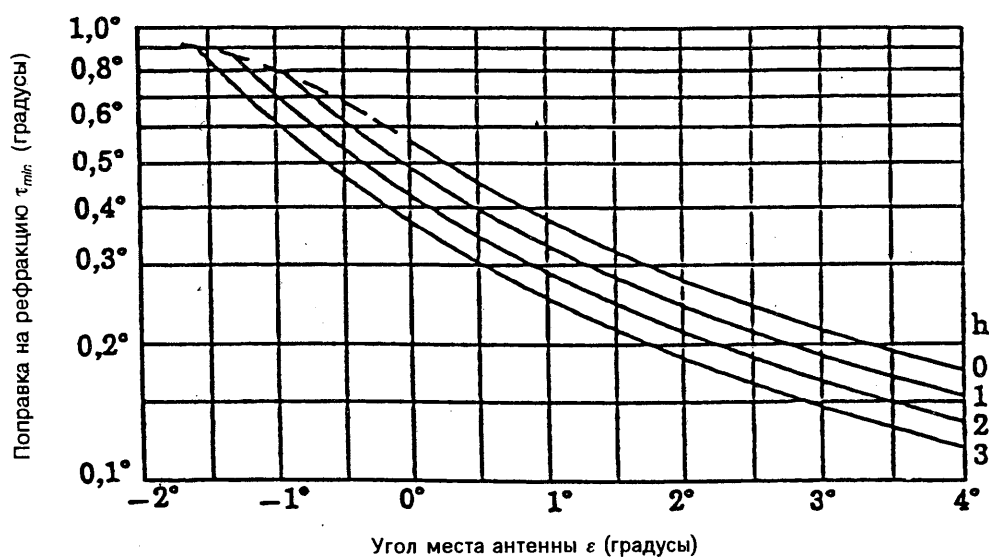
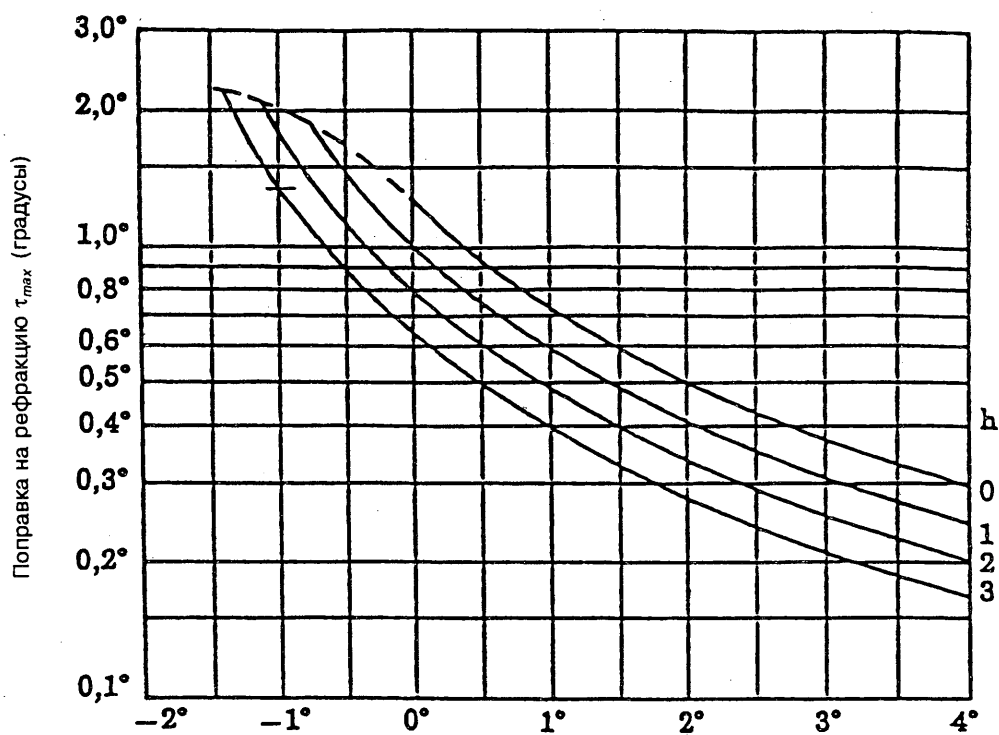
$N_0 = 250$ и $\Delta N = -30$ при минимальном искривлении.

После интегрирования результаты расчета представлены на рис. 9.

Нужно заметить, что кривые на рис. 9 слегка отличаются от кривых на рис. 2.

ССЫЛКА

SKOLNIK, M.I. [1970] Radar handbook, Chapter 24. McGraw-Hill, New York.



h : высота антенны над средним уровнем моря (км)

$N_0 = 400$ и $\Delta N = -68$ при максимальном искривлении

$N_0 = 250$ и $\Delta N = -30$ при минимальном искривлении

РИСУНОК 9 — Поправка на рефракцию при угле места ϵ

ДОПОЛНЕНИЕ 2

ОСНОВАНИЯ РИС. 2 ОТЧЕТА 393

Оригинал рис. 2 Отчета 393 находится в [Lundgren и др., December 1969]. Теоретические расчеты поправки на рефракцию выполнялись следующим образом.

Нулевой и положительный первоначальные углы

Сначала индекс рефракции N_S на высоте станции рассчитывается следующим образом:

$$N_S = N_0 \cdot \exp(-h/7) \quad h \geq 0, \quad (16)$$

где

$N_0 = 400$ (максимальное искривление) или 250 (минимальное искривление);

h — высота станции (км).

Затем рассчитывается разность индексов ΔN (в единицах N) между высотой станции и высотой 1 км над станцией:

$$\Delta N = -7,32 \cdot \exp(0,005577 N_S). \quad (17)$$

Индекс рефракции $n(r)$ определяется следующим выражением, где h берется как эталонная высота:

$$n(r) = 1 + a \cdot \exp[-b(r - r_0 - h)], \quad (18)$$

где

$$a = N_S \cdot 10^{-6}$$

$$b = \ln[N_S/(N_S + \Delta N)];$$

r_0 — радиус Земли.

На основе вышеприведенных предположений полная поправка на рефракцию рассчитывается с помощью следующего интеграла:

$$\tau = - \int [\cot \varepsilon / n(r)] dn. \quad (19)$$

Однако, чтобы упростить расчет, член $1/n$ берется за единицу с ошибкой меньше, чем 0,0001. Интеграл заменяется суммой значений подынтегральной функции в точках через интервалы 250 метров. При интегрировании использовано выражение (15) из Дополнения 1.

Отрицательные первоначальные углы

Когда первоначальный угол отрицательный, существует высота h_m , где радиолуч становится параллельным поверхности Земли. Это значение h_m берется как эталонное для определения экспоненциальной модели рефракции. Таким образом, h_m определяется решением следующих уравнений:

$$N_S = N_0 \cdot \exp(-h_m/7); \quad (20)$$

$$\Delta N = -7,32 \cdot \exp(0,005577 N_S); \quad (21)$$

$$a = N_S \cdot 10^{-6}; \quad (22)$$

$$b = \ln[N_S/(N_S + \Delta N)]; \quad (23)$$

$$(r_0 + h_m) \cdot (1 + a) = (r_0 + h) \cdot [1 + a \cdot \exp[-b(h - h_m)]] \cdot \cos \varepsilon_1, \quad (24)$$

где ε_1 — первоначальный угол.

Затем полная поправка на рефракцию рассчитывается как сумма поправок между h_m и h и между h_m и орбитой, где индекс $n(r)$ выражается как:

$$n(r) = 1 + a \cdot \exp[-b(r - r_0 - h_m)]. \quad (25)$$

Замечания о приведенных выше расчетах представлены в [МККР, 1986—1990].

ССЫЛКИ

LUNDGREN, C. W. and MAY, A. S. [December 1969] Radio-relay antenna pointing for controlled interference with geostationary satellites. *BSTJ*, Vol. 48, 10, 3387—3422.

Документы МККР

[1986—1990]: 4/277—9/266 (Add.1).

ПРИЛОЖЕНИЕ II

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАЗДЕЛЯЮЩИХ УГЛОВ

(МЕТОД А)

Детальные расчеты действительного углового разнеса необходимы в случаях, когда максимальное значение э.и.и.м. рассматриваемых наземных передающих станций больше + 35 дБВт на частотах от 1 до 10 ГГц или больше + 45 дБВт на частотах между 10 и 15 ГГц, и

- a) азимут оси максимального излучения антенны находится внутри одного из азимутальных секторов, которых следует избегать, показанных в таблице II; или
- b) угол места оси максимального излучения антенны находится вне интервала от -1° до $+4^\circ$; или
- c) широта места расположения станции выше 75° ; и
- d) максимальное значение э.и.и.м. на частотах между 1 и 10 ГГц больше + 47 дБВт.

1. В следующих ниже параграфах представлен метод расчета минимального разделяющего угла между направлением оси максимального излучения антенны наземной станции и геостационарной спутниковой орбитой — метод, обеспечивающий достаточную аппроксимацию. Эта аппроксимация исходит из того, что определение разделяющего угла проводится в плоскости, содержащей направление максимального излучения, перпендикулярной плоскости экватора. В действительности рассматриваемый минимальный разделяющий угол может находиться в плоскости, не перпендикулярной плоскости экватора, но вносимая ошибка незначительна, поскольку при рассмотрении отношения точки на поверхности Земли к геостационарной орбите (ГСО) участвуют очень малые углы.

2. На рис. 10 показано общее геометрическое построение, где разделяющий угол¹⁾ δ представляет разность углов BAC и BAD. Поскольку эти два угла являются частью прямого угла треугольников ABC и ABD, их значение можно определить, когда известны расстояния¹⁾ $\overline{AB}$, $\overline{BC}$ и $\overline{BD}$:

¹⁾ Все углы выражены в градусах, а расстояние — в км.

$$\angle BAC = \arctan \left(\frac{\overline{BC}}{\overline{AB}} \right), \quad (26)$$

$$\angle BAD = \arctan \left(\frac{\overline{BD}}{\overline{AB}} \right), \quad (27)$$

где

$$\overline{AB} = r_e \sin \lambda; \quad (28)$$

r_e — средний радиус Земли = 6370 км;

λ — широта станции (точка А на рис. 10);

$\overline{BC}$ и $\overline{BD}$ определены ниже.

2.1 Рассматривая прямоугольный сферический треугольник ASE на рис. 10, найдем, что

$$\Psi = \arctan (\tan \alpha \sin \lambda), \quad (29)$$

где

α — угол между азимутом оси максимального излучения антенны А и меридианом, содержащим А;

тогда

$$\alpha = \arccos (\cos \Psi \cos \lambda). \quad (30)$$

Обозначения

- A: расположение антенны наземной станции
- λ : широта точки A
- AOC: азимутальная плоскость направления передачи
- S: точка пересечения экватора и плоскости AOC
- Ψ : разность долготы точек E и S
- B: проекция точки A на плоскость экватора
- C: пересечение луча, подвергнутого рефракции, с плоскостью экватора
- D: точка пересечения ГСО с плоскостью ABC
- E: пересечение экватора с меридианом, содержащим точку A
- α : угол между азимутом оси максимального излучения антенны и меридианом, содержащим антенну

α : $\angle AOC$
 μ : $\angle OBC$

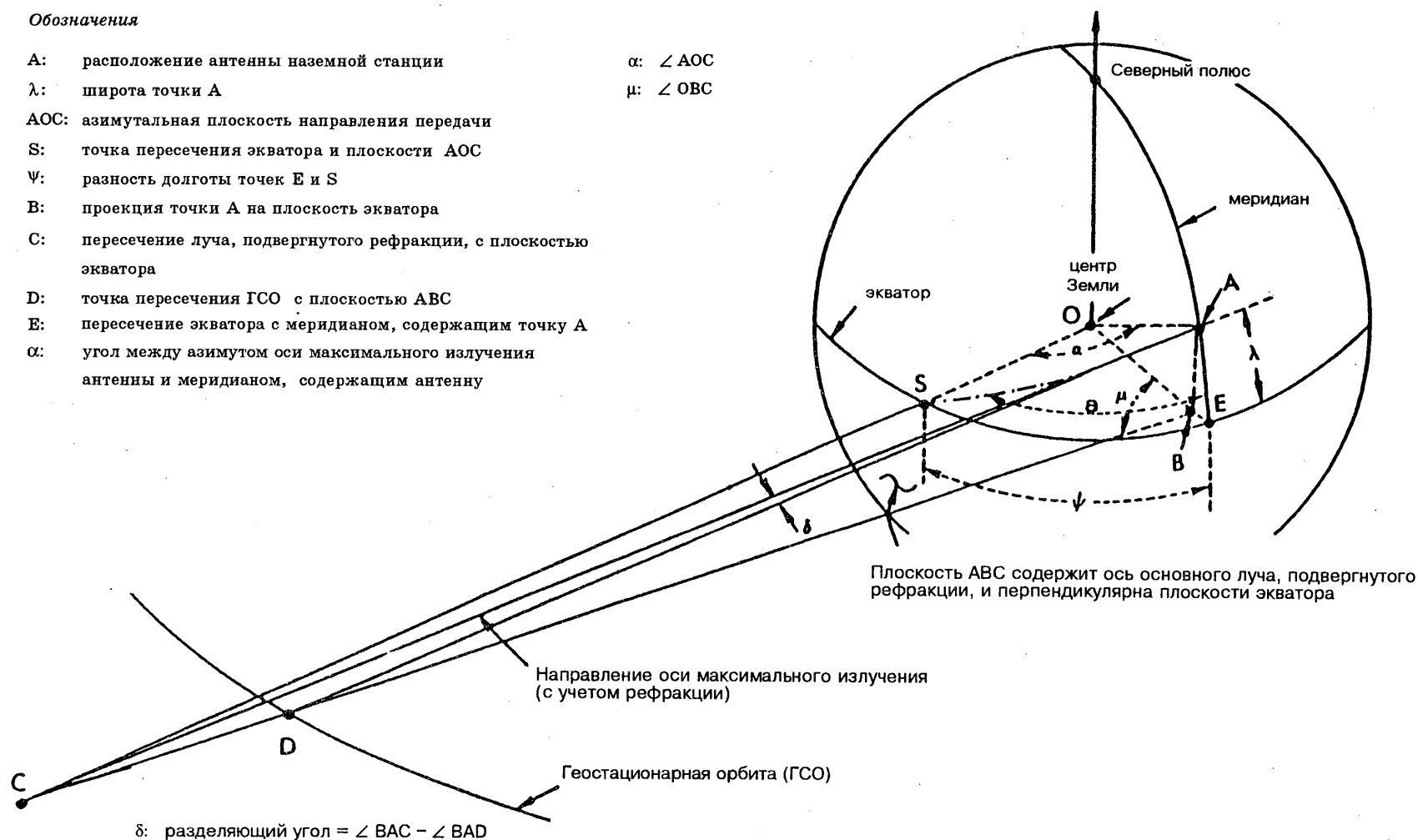
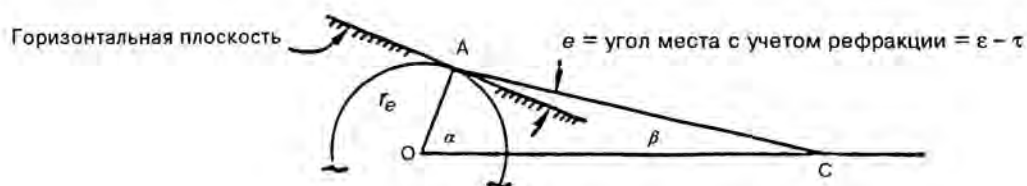


РИСУНОК 10 – Геометрическое построение, поясняющее направление луча антенны вне ГСО

2.2 Рассматривая вид в направлении, перпендикулярном азимутальной плоскости АОС, как на эскизе,



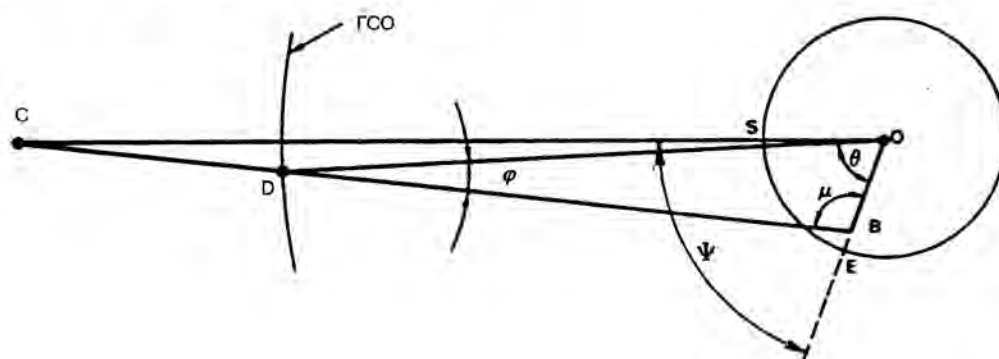
найдем, что

$$\overline{OC} = r_e \frac{\sin (90 + e)}{\sin (90 - e - \alpha)},$$

или

$$\overline{OC} = r_e \frac{\cos e}{\cos (e + \alpha)}. \quad (6)$$

3. Чтобы рассчитать расстояния $\overline{BD}$ и $\overline{BC}$, необходимо рассмотреть треугольники ОВС и ОВД в плоскости экватора, как показано ниже:



Учитывая простые соотношения:

$$\begin{aligned} \overline{OD} & \text{— радиус ГСО} = 6,62 r_e, \text{ измеренный от центра Земли,} \\ \overline{OB} & = r_e \cos \lambda, \end{aligned} \quad (7)$$

оставшиеся нужные геометрические параметры можно тогда рассчитать по следующим формулам:

$$\overline{BC} = \sqrt{(\overline{OB})^2 + (\overline{OC})^2 - 2 (\overline{OB}) (\overline{OC}) \cos \Psi} \quad (8)$$

$$\mu = \arcsin \left(\frac{\overline{OC}}{\overline{BC}} \sin \Psi \right), \quad (9)$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{\overline{OB}}{\overline{OD}} \sin \mu \right), \quad (10)$$

$$\theta = 180 - (\mu + \varphi), \quad (11)$$

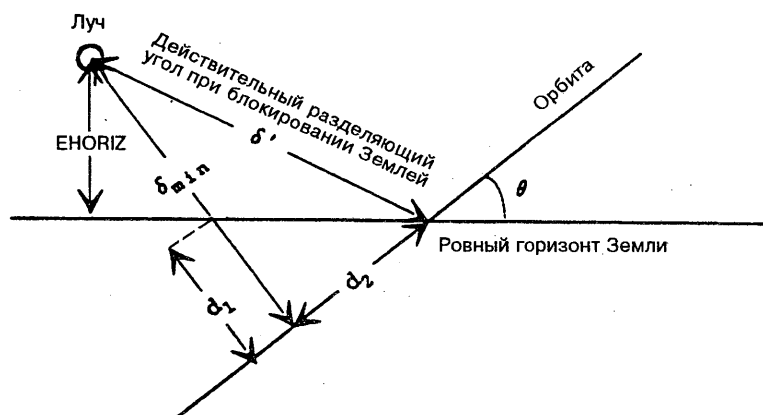
$$\overline{BD} = \frac{\sin \theta}{\sin \varphi} \cdot \overline{OB}. \quad (12)$$

4. Наконец, разделяющий угол δ определяется выражением

$$\delta = \arctan \left(\frac{BC}{AB} \right) - \arctan \left(\frac{BD}{AB} \right) \quad (38)$$

5. Данный разделяющий угол δ должен рассчитываться дважды при подстановке в формулу (31), выше, углов e для двух значений τ , $\tau_{\max}$ и $\tau_{\min}$ (см. подпункт 2). Рассчитанное таким образом наименьшее абсолютное значение разделяющего угла $\tau_{\min}$ используется для определения регламентного предела (см. 5.2), за исключением ситуации, когда данный разделяющий угол пересекается горизонтом. Это может случиться, когда луч проходит над орбитой. В случае ровного земного горизонта действительный разделяющий угол δ' рассчитывается следующим образом:

“5.1



$$EHORIZ = - \arccos (8500 / (8500 + h)) ; \quad (39)$$

h = высота антенны (над средним уровнем моря) в км;

$$d_1 = \delta_{\min} - EHORIZ / \cos \theta ; \quad (40)$$

$$d_2 = d_1 / \tan \theta ; \quad (41)$$

$$\delta' = (\delta_{\min}^2 + d_2^2)^{0,5} . \quad (42)$$

5.2 Значение $\delta_{\min}$ или δ' затем используется для определения регламентного предела э.и.и.м., примененного в рассматриваемом случае работы на частотах между 1 и 10 ГГц (между 10 и 15 ГГц этот предел всегда равен + 55 дБВт)“.

5.3 Допустимое значение э.и.и.м. тогда равно:

$$47 \text{ дБВт} \quad |\delta| \leq 0,5$$

$$47 + 8 (|\delta| - 0,5) \text{ дБВт} \quad 0,5 < |\delta| < 1,5$$

$$55 \text{ дБВт} \quad |\delta| \geq 1,5$$

или его можно найти на рис. 8.

6. В качестве примера был сделан более точный расчет гипотетической ситуации, изложенной как пример 2 в § 5 Приложения к циркулярному письму МКРЧ № 542, с использованием только что представленного метода.

“6.1 Если предполагается, что наземная станция в указанном примере имеет следующие параметры:

широта	24,0° ю.ш.
долгота	любая
высота (над средним уровнем моря)	1000 м
азимут главной оси луча	88,7°
угол места	1°,

тогда можно видеть (из рис. 2), что поправка на рефракцию будет между 0,58 и 0,31°. В результате разделяющие углы и допустимые значения э.и.и.м. равны:

Условия рефракции	Разделяющий угол δ	Допустимое значение э.и.и.м.	Соответствие п. 2506 Регламента радиосвязи
$\tau_{\max} = 0,58^\circ$	$-2,54^\circ$	+55 дБВт	Да
$\tau_{\min} = 0,31^\circ$	$-2,65^\circ$	+55 дБВт	Да

”

Примечание 1. — В МКРЧ имеется компьютерная программа для расчета разделяющих углов и определения соответствия значений э.и.и.м. пункту 2506 Регламента радиосвязи, основанная на вышеприведенном методе.

В этой программе ссылки на номера уравнений нужно увеличить на 25, с тем чтобы комментарии, данные в программе, соответствовали нумерации уравнений в данном приложении.

6.2 Вывод: хотя азимут наземной станции находится внутри сектора, указанного в таблице II, точный расчет показывает, что направление максимального излучения проходит с солидным запасом вне углового предела 1,5°. Этот конкретный расчет служит хорошим примером, иллюстрирующим присущий таблице II консерватизм, основанный на ситуации двух худших случаев: одна колонка выведена при минимальном угле места и максимальной рефракции, а другая — при максимальном угле места при отсутствии рефракции.

ТАБЛИЦА II — Азимутальные секторы, которых следует избегать при направлении осей основных лучей антенн наземных передающих станций фиксированной или подвижной службы (Статья 27), когда используется значение з.и.м., равное +55 дБВт

(Азимут измеряется относительно истинного севера и выражается в градусах и десятых долях градуса)

Разделяющий угол — $1,5^\circ$
Угол места антенны — от -1° до $+4^\circ$
Влияние рефракции — от -2° до 0°

Широта С или Ю	Северное полушарие				Южное полушарие			
	От	До	От	До	От	До	От	До
0	88,50	91,50	268,50	271,50	88,50	91,50	268,50	271,50
1	88,60	91,73	268,27	271,40	88,27	91,40	268,60	271,73
2	88,70	91,95	268,05	271,30	88,05	91,30	268,70	271,95
3	88,80	92,18	267,82	271,20	87,82	91,20	268,80	272,18
4	88,90	92,41	267,59	271,10	87,59	91,10	268,90	272,41
5	88,99	92,63	267,37	271,01	87,37	91,01	268,99	272,63
6	89,09	92,86	267,14	270,91	87,14	90,91	269,09	272,86
7	89,19	93,09	266,91	270,81	86,91	90,81	269,19	273,09
8	89,29	93,33	266,67	270,71	86,67	90,71	269,29	273,33
9	89,38	93,56	266,44	270,62	86,44	90,62	269,38	273,56
10	89,48	93,80	266,20	270,52	86,20	90,52	269,48	273,80
11	89,58	94,04	265,96	270,42	85,96	90,42	269,58	274,04
12	89,68	94,28	265,72	270,32	85,72	90,32	269,68	274,28
13	89,78	94,52	265,48	270,22	85,48	90,22	269,78	274,52
14	89,88	94,76	265,24	270,12	85,24	90,12	269,83	274,76
15	89,97	95,01	264,99	270,03	84,99	90,03	269,97	275,01
16	90,07	95,26	264,74	269,93	84,74	89,93	270,07	275,26
17	90,17	95,52	264,48	269,83	84,48	89,83	270,17	275,52
18	90,27	95,77	264,23	269,73	84,23	89,73	270,27	275,77
19	90,38	96,03	263,97	269,62	83,97	89,62	270,38	276,03
20	90,48	96,30	263,70	269,52	83,70	89,52	270,48	276,30
21	90,58	96,57	263,43	269,42	83,43	89,42	270,58	276,57
22	90,68	96,84	263,16	269,32	83,16	89,32	270,68	276,84
23	90,79	97,12	262,88	269,21	82,88	89,21	270,79	277,12
24	90,89	97,40	262,60	269,11	82,60	89,11	270,89	277,40
25	91,00	97,69	262,31	269,00	82,31	89,00	271,00	277,69
26	91,11	97,98	262,02	268,89	82,02	88,89	271,11	277,98
27	91,22	98,28	261,72	268,78	81,72	88,78	271,22	278,28
28	91,33	98,58	261,42	268,67	81,42	88,67	271,33	278,58
29	91,44	98,89	261,11	268,56	81,11	88,56	271,44	278,89
30	91,56	99,21	260,79	268,44	80,79	88,44	271,56	279,21
31	91,67	99,54	260,46	268,33	80,46	88,33	271,67	279,54
32	91,79	99,87	260,13	268,21	80,13	88,21	271,79	279,87
33	91,91	100,21	259,79	268,09	79,79	88,09	271,91	280,21
34	92,03	100,56	259,44	267,97	79,44	87,97	272,03	280,56
35	92,16	100,92	259,08	267,84	79,08	87,84	272,16	280,92
36	92,28	101,29	258,71	267,72	78,71	87,72	272,28	281,29
37	92,41	101,67	258,33	267,59	78,33	87,59	272,41	281,67
38	92,54	102,06	257,94	267,46	77,94	87,46	272,54	282,06
39	92,68	102,46	257,54	267,32	77,54	87,32	272,68	282,46
40	92,82	102,88	257,12	267,18	77,12	87,18	272,82	282,88
41	92,96	103,31	256,69	267,04	76,69	87,04	272,96	283,31
42	93,11	103,75	256,25	266,89	76,25	86,89	273,11	283,75
43	93,26	104,21	255,79	266,74	75,79	86,74	273,26	284,21
44	93,41	104,69	255,31	266,59	75,31	86,59	273,41	284,69
45	93,57	105,19	254,81	266,43	74,81	86,43	273,57	285,19
46	93,74	105,70	254,30	266,26	74,30	86,26	273,74	285,70
47	93,91	106,24	253,76	266,09	73,76	86,09	273,91	286,24
48	94,08	106,80	253,20	265,92	73,20	85,92	274,08	286,80
49	94,26	107,38	252,62	265,74	72,62	85,74	274,26	287,38
50	94,45	107,99	252,01	265,55	72,01	85,55	274,45	287,99
51	94,65	108,63	251,37	265,35	71,37	85,35	274,65	288,63
52	94,85	109,30	250,70	265,15	70,70	85,15	274,85	289,30
53	95,06	110,00	250,00	264,94	70,00	84,94	275,06	290,00
54	95,29	110,74	249,26	264,71	69,26	84,71	275,29	290,74
55	95,52	111,53	248,47	264,48	68,47	84,48	275,52	291,53
56	95,76	112,35	247,65	264,24	67,65	84,24	275,76	292,35
57	96,02	113,23	246,77	263,98	66,77	83,98	276,02	293,23
58	96,29	114,17	245,83	263,71	65,83	83,71	276,29	294,17
59	96,57	115,17	244,83	263,43	64,83	83,43	276,57	295,17
60	96,87	116,23	243,77	263,13	63,77	83,13	276,87	296,23
61	97,19	117,38	242,62	262,81	62,62	82,81	277,19	297,38
62	97,52	118,61	241,39	262,48	61,39	82,48	277,52	298,61
63	97,88	119,95	240,05	262,12	60,05	82,12	277,88	299,95
64	98,27	121,40	238,60	261,73	58,60	81,73	278,27	301,40
65	98,68	122,99	237,01	261,32	57,01	81,32	278,68	302,99
66	99,13	124,73	235,27	260,87	55,27	80,87	279,13	304,73
67	99,60	126,66	233,34	260,40	53,34	80,40	279,60	306,66
68	100,13	128,82	231,18	259,87	51,18	79,87	280,13	308,82
69	100,69	131,25	228,75	259,31	48,75	79,31	280,69	311,25
70	101,31	134,02	225,98	258,69	45,98	78,69	281,31	314,02
71	102,00	137,23	222,77	258,00	42,77	78,00	282,00	317,23
72	102,75	141,03	218,97	257,25	38,97	77,25	282,75	321,03
73	103,60	145,68	214,32	256,40	34,32	76,40	283,60	325,68
74	104,55	151,67	208,33	255,45	28,33	75,45	284,55	331,67
75	105,62	160,34	199,66	254,38	19,66	74,38	285,62	340,34

ПРИЛОЖЕНИЕ III

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА РАЗДЕЛЯЮЩИХ УГЛОВ
МЕЖДУ ЛУЧАМИ АНТЕНН РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СТАНЦИЙ
И ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТОЙ

(МЕТОД В)

Параметры, необходимые для расчета:

- (1) B : разделяющий угол, которого следует избегать (2° для 1—10 ГГц и $1,5^\circ$ для 10—15 ГГц);
- (2) L : широта станции (абсолютное значение);
- (3) A_0 : азимут основного луча антенны (измеряемый либо по часовой стрелке, либо против часовой стрелки от юга в северном полушарии и от севера в южном полушарии. $0 \leq A_0 \leq 180^\circ$);
- (4) ϵ_0 : угол места основного луча антенны;
- (5) $\tau_{\max}(\epsilon)$: максимальное искривление луча в атмосфере, соответствующее углу места ϵ ;
- (6) $\tau_{\min}(\epsilon)$: минимальное искривление луча в атмосфере, соответствующее углу места ϵ ;
- (7) ϵ_m : минимальное значение угла места по отношению к местному горизонту, видимому со станции, в диапазоне значений азимута между $A_0 - B$ и $A_0 + B$ (см. примечание 1).

Кроме того, выведены следующие формулы:

$$(8) \quad F(E) = \arccos(K^{-1} \cos E),$$

где K — отношение радиуса орбиты к радиусу Земли, предполагается равным 6,63 (см. примечание 2).

$$(9) \quad S(A, E) = \arcsin \left[\sin L \cdot \cos(F - E) - \cos L \cdot \sin(F - E) \cdot \cos A \right],$$

где $S(A, E)$ — угол между лучом и орбитой в градусах (см. примечание 3).

$$(10) \quad C(E) = \arccos \left[\tan L / \tan(F - E) \right],$$

где $C(E)$ — азимут орбиты, соответствующий углу места с учетом рефракции, равному E , в градусах. Следует заметить, что F в формулах (9) и (10) рассчитан по значению E из формулы (8).

$$(11) \quad \alpha = \arcsin L / \sqrt{(1 - K^2)^2 + (K^{-1} \sin L)^2},$$

где $\arcsin \alpha$ — угол между горизонтом и линией, перпендикулярной геостационарной орбите в азимутальном направлении, где геостационарная орбита пересекает горизонт, видимый с широты L .

Нужно заметить, что когда $S(A, E)$ имеет положительное значение, луч находится над орбитой, а когда значение $S(A, E)$ отрицательное, луч ниже орбиты.

Следующие ниже расчеты выполнены при предположении, что местный горизонт плоский, что его высота равна наименьшему значению высоты над местным горизонтом в интервале азимутов от $A_0 - B$ до $A_0 + B$. Если местный горизонт не плоский, то выводы из расчетов нужно толковать следующим образом:

- если расчет показывает, что разделяющий угол равен по крайней мере B градусам, то вывод правильный, когда даже принят во внимание сложный контур линии местного горизонта;
- если расчет показывает, что разделяющий угол меньше B градусов, нужно использовать для дальнейшего исследования графический метод, описанный в разделе 5.3 Отчета 393. Графический анализ может показать, что в некоторых случаях разделяющий угол равен по крайней мере B градусам из-за сложного контура линии местного горизонта.

Первоначальный шаг

Прежде всего рассчитайте с учетом рефракции угол места E_m , соответствующий ε_m при максимальном искривлении луча в атмосфере, и азимут A_m геостационарной орбиты, соответствующий E_m :

$$E_m = \varepsilon_m - \tau_{\max}(\varepsilon_m), \quad A_m = C(E_m).$$

Если A_0 равно или больше, чем $A_m + B$, то нужно рассмотреть три следующих случая в зависимости от значения ε_0 :

Случай 1: $\varepsilon_m < \varepsilon_0$: Выполняйте Шаг A1

Случай 2: $\varepsilon_m - B < \varepsilon_0 \leq \varepsilon_m$: Выполняйте Шаг B1

Случай 3: $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_m - B$: Разделяющий угол составляет по крайней мере B градусов.

Шаг A1

Рассчитайте с учетом рефракции угол места E_1 основного луча, соответствующий минимальному искривлению в атмосфере:

$$E_1 = \varepsilon_0 - \tau_{\min}(\varepsilon_0).$$

Рассчитайте $S_1 = S(A_0, E_1)$.

Если S_1 равен нулю, то разделяющий угол равен нулю.

Если S_1 отрицательный, то выполняйте Шаг A2.

Если S_1 положительный, то выполняйте Шаг A3.

Шаг А2

В этом случае основной луч ниже орбиты как при максимальном, так и при минимальном искривлении в атмосфере. Угол места и азимут направления на периферии луча при разделяющем угле B от основного луча на линии, перпендикулярной орбите, равны:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 + \alpha \cdot B, \quad A_2 = A_0 + \sqrt{1 - \alpha^2} B.$$

Рассчитайте $E_2 = \varepsilon_2 - \tau_{\min}(\varepsilon_2)$ и $S_2 = S(A_2, E_2)$.

Если S_2 равен нулю или отрицательный, то разделяющий угол равен по крайней мере B градусам. (Действительный разделяющий угол можно установить как $B \cdot S_1/(S_1 - S_2)$ градусов.)

Если S_2 положительный, то разделяющий угол меньше B градусов. Точное значение разделяющего угла равно $B \cdot S_1/(S_1 - S_2)$ градусов. (Примечание: этот вывод основан на предположении, в большинстве случаев справедливом, что направление на геостационарную орбиту не закрыто местным горизонтом. Если в исключительном случае направление закрыто, необходимо более детальное исследование и может быть применен графический метод).

Шаг А3

В этом случае основной луч выше орбиты при минимальном искривлении в атмосфере. Ниже мы изучим случай максимального искривления в атмосфере.

Рассчитайте $E_3 = \varepsilon_0 - \tau_{\max}(\varepsilon_0)$ и $S_3 = S(A_0, E_3)$.

Если S_3 равен нулю или отрицательный, разделяющий угол равен нулю.

Если S_3 положительный — выполняйте Шаг А4.

Шаг А4

В этом случае основной луч выше орбиты как при максимальном, так и при минимальном искривлении в атмосфере. Угол места и азимут направления на периферии луча при разделяющем угле B от основного луча на линии, перпендикулярной орбите, равны:

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_0 - \alpha \cdot B, \quad A_4 = A_0 - \sqrt{1 - \alpha^2} B.$$

Если $\varepsilon_4 < \varepsilon_m$, выполняйте Шаг А5, а если $\varepsilon_4 \geq \varepsilon_m$, продолжайте следующим образом:

Рассчитайте $E_4 = \varepsilon_4 - \tau_{\max}(\varepsilon_4)$ и $S_4 = S(A_4, E_4)$.

Если S_4 равен нулю или положительный, то разделяющий угол равен по крайней мере B градусам. (Действительный разделяющий угол можно установить как $B \cdot S_3/(S_3 - S_4)$ градусов.)

Если S_4 отрицательный, а местный горизонт плоский, то разделяющий угол меньше B градусов. Точное значение разделяющего угла равно $B \cdot S_3/(S_3 - S_4)$ градусов. Если местный горизонт не плоский, то для дальнейшего исследования нужно применить графический метод.

Шаг А5

В этом случае, замечая, что α не равно нулю, рассчитайте:

$$A_5 = A_0 - (\varepsilon_0 - \varepsilon_m) \sqrt{1 - \alpha^2} / \alpha ,$$

где A_5 — азимут направления, в котором линия, проходящая через основной луч и перпендикулярная орбите, пересекает местный горизонт под углом места ε_m .

Если $A_5 \leq A_m$ (где значение A_m было рассчитано в *Первоначальном шаге*), а местный горизонт плоский, разделяющий угол меньше B градусов. Точное значение разделяющего угла равно:

$$\left[(\varepsilon_0 - \varepsilon_m) / \alpha \right] \cdot S_3 / (S_3 - S_5) \text{ градусов,}$$

где $S_5 = S(A_5, E_m)$, а значение E_m было рассчитано в *Первоначальном шаге*. Если местный горизонт не плоский, то для дальнейшего исследования нужно применить графический метод.

Если $A_5 > A_m$, выполняйте Шаг А6.

Шаг А6

В этом случае угол места и азимут направления на орбиту, ближайшего от основного луча, равны ε_m и A_m . Поэтому угол D_m между этим направлением и основным лучом равен:

$$D_m = \sqrt{(\varepsilon_m - \varepsilon_0)^2 + (A_m - A_0)^2} .$$

Если $D_m \geq B$, разделяющий угол равен, по крайней мере, B градусам. (Действительный разделяющий угол равен D_m градусам.)

Если $D_m < B$, а местный горизонт плоский, разделяющий угол меньше B градусов. Точное значение разделяющего угла равно D_m градусам. Если местный горизонт не плоский, то для дальнейшего исследования нужно применить графический метод.

Шаг В1

В этом случае основной луч не переходит за местный горизонт. Поэтому рассчитайте с учетом рефракции угол места E_n , соответствующий ε_m при минимальном искривлении в атмосфере:

$$E_n = \varepsilon_m - \tau_{\min}(\varepsilon_m) .$$

Рассчитайте $S_1 = S(A_0, E_n)$.

Если S_1 равен нулю, разделяющий угол равен $\varepsilon_m - \varepsilon_0$, что меньше B градусов.

Если S_1 отрицательный, выполняйте Шаг В2.

Если S_2 положительный, выполняйте Шаг В4.

Шаг В2

В этом случае луч при угле места ε_m и азимуте A_0 ниже орбиты как при максимальном, так и при минимальном искривлении в атмосфере. Угол места и азимут направления на периферии луча при разделяющем угле B от основного луча на линии, перпендикулярной орбите, равны:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_0 + \alpha \cdot B, \quad A_2 = A_0 + \sqrt{1 - \alpha^2} B.$$

Если $\varepsilon_2 \leq \varepsilon_m$, выполняйте Шаг В3, а если $\varepsilon_2 > \varepsilon_m$, то продолжайте следующим образом.

Рассчитайте $E_2 = \varepsilon_2 - \tau_{\min}(\varepsilon_2)$ и $S_2 = S(A_2, E_2)$.

Если S_2 равен нулю или отрицательный, разделяющий угол равен по крайней мере B градусам. (Первая формула, ниже, для случая $S_2 > 0$ дает возможность установить значение действительного разделяющего угла.)

Если S_2 положительный, а местный горизонт плоский, то разделяющий угол меньше B градусов. Чтобы установить точное значение разделяющего угла, рассчитайте:

$$A_h = A_0 + (\varepsilon_m - \varepsilon_0) \sqrt{1 - \alpha^2} / \alpha;$$

$$A_n = C(E_n),$$

где A_h — азимут направления, в котором линия, проходящая через основной луч и перпендикулярная орбите, пересекает местный горизонт при угле места ε_m , A_n — азимут направления, в котором орбита пересекает местный горизонт при угле места ε_m при минимальном искривлении в атмосфере, а E_n была рассчитана в Шаге В1.

Если $A_h < A_n$, точное значение разделяющего угла равно

$$[S_h \cdot B - S_2 \cdot (\varepsilon_m - \varepsilon_0) / \alpha] / (S_h - S_2) \text{ градусам,}$$

где $S_h = S(A_h, E_n)$. (Поскольку компьютер может оперировать лишь ограниченным числом цифр, вышеприведенная формула может быть неподходящей в исключительных случаях, когда значение S_h оказывается очень близким к значению S_2 . Поэтому она должна применяться, когда $|S_h - S_2| > \Delta$ градусов. Если этого нет, то разумно установить значение разделяющего угла равным $B - S_2$ градусам. Здесь Δ — подходящее малое число, например 0,001 градуса).

Если $A_h \geq A_n$, то точное значение разделяющего угла равно

$$\sqrt{(\varepsilon_m - \varepsilon_0)^2 + (A_n - A_0)^2} \text{ градусам.}$$

Если местный горизонт не плоский, то для дальнейшего исследования нужно применить графический метод.

Шаг В3

В этом случае разделяющий угол, меньший или не меньший, чем B градусов, можно определить, рассчитав угол D_n между основным лучом и направлением при угле места ε_m и азимуте A_n :

$$D_n = \sqrt{(\varepsilon_m - \varepsilon_0)^2 + (A_n - A_0)^2},$$

где A_n — азимут орбиты, определенный в Шаге В2.

Если $D_n \geq B$, разделяющий угол равен по крайней мере B градусам. (Заметим, что точное значение разделяющего угла необязательно может быть равно D_n градусам. Оно может быть меньшим.)

Если $D_n < B$, а местный горизонт плоский, то разделяющий угол меньше B градусов. Точное значение разделяющего угла равно D_n градусам. Если местный горизонт не плоский, то для дальнейшего исследования нужно применить графический метод.

Шаг В4

В этом случае луч при угле места ε_m и азимуте A_0 выше орбиты при минимальном искривлении в атмосфере. Ниже мы изучим случай максимального искривления луча в атмосфере.

Если $A_0 \leq A_m$ (где A_m рассчитан в Первоначальном шаге), разделяющий угол меньше B градусов. Если местный горизонт плоский, точное значение разделяющего угла равно $\varepsilon_m - \varepsilon_0$ градусам. Если местный горизонт не плоский, то для дальнейшего исследования нужно применить графический метод.

Если $A_0 > A_m$, выполняйте Шаг В5.

Шаг В5

Шаг В5 идентичен Шагу А6.

Примечание 1. — Если местный горизонт образован плоской террасой или морем, то значение ε_m определяется формулой:

$$\varepsilon_m = -\arccos \left[\frac{R + h_1}{R + h_0} \cdot \frac{1 + N_0 \cdot 10^{-6} (1 + \Delta N / N_0) h_1}{1 + N_0 \cdot 10^{-6} (1 + \Delta N / N_0) h_0} \right],$$

где h_0 — высота станции (км), h_1 — высота местного горизонта (км) ($h_0 \geq h_1$), а R — радиус Земли, предполагаемый равным 6370 км.

Если быть точным, значение ε_m изменяется в зависимости от атмосферной рефракции, что видно из вышеприведенной формулы. Однако эти изменения малы. Ввиду этого и для большей верности значение ε_m должно рассчитываться для случая минимального искривления луча в атмосфере ($N_0 = 250$ и $\Delta N = -30$).

На практике может быть трудно установить точное значение ε_m , учитывая сложный контур линии местного горизонта. В таком случае может быть проще установить значение ε_m , используя приведенную выше формулу, в предположении, что $h_1 = 0$. Если расчет, основанный на этом предположении, показывает, что разделяющий угол равен по крайней мере B градусам, этот вывод правильный, даже если учесть сложный контур линии местного горизонта. Если расчет показывает, что разделяющий угол меньше B градусов, то нужно снова выполнить расчет, используя действительное значение ε_m .

Примечание 2. — F должен быть положительным, а если абсолютное значение E не очень велико (меньше 5°), можно положить F равным $81,33^\circ$.

Примечание 3. — Эта формула может быть выведена следующим образом.

Предположим, что параметры наземной радиорелейной станции следующие:

- широта L (абсолютное значение),
- азимут основного луча антенны A (измеренный по часовой стрелке от юга в северном полушарии и от севера — в южном полушарии),
- угол места основного луча антенны E (после учета влияния рефракции).

Расчет сначала будет выполнен для радиорелейной станции в северном полушарии.

Траекторию основного луча антенны радиорелейной станции можно выразить в трехмерном пространстве как:

$$x = R \cos L + u (\sin E \cdot \cos L + \cos E \cdot \sin L \cdot \cos A) \quad (1)$$

$$y = -u \cdot \cos E \cdot \sin A \quad (2)$$

$$z = R \sin L + u (\sin E \cdot \sin L - \cos E \cdot \cos L \cdot \cos A), \quad (3)$$

где R — радиус Земли, а долгота радиорелейной станции принята равной нулю (в плоскости $x - z$). Выведена следующая формула:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 + u^2 + 2Ru \cdot \sin E. \quad (4)$$

Основной луч антенны радиорелейной станции попадает на поверхность сферы с радиусом орбиты, когда $x^2 + y^2 + z^2 = K^2 R^2$ (где K — отношение радиусов орбиты и Земли, предполагаемое равным 6,63), то есть

$$u/R = \sqrt{K^2 - \cos^2 E} - \sin E. \quad (5)$$

Разделяющий угол S можно рассчитать по следующей формуле:

$$z = KR \sin S. \quad (6)$$

Следовательно:

$$\sin S = \frac{1}{K} \left[\sin L + (\sqrt{K^2 - \cos^2 E} - \sin E) \cdot (\sin E \cdot \sin L - \cos E \cdot \cos L \cdot \cos A) \right], \quad (7)$$

где S положительный, если ось луча антенны выше орбиты. Эта формула может быть также представлена в виде:

$$F = \arccos (K^{-1} \cos E)$$

$$\sin S = \sin L \cdot \cos (F - E) - \cos L \cdot \sin (F - E) \cdot \cos A . \quad (8)$$

Если радиорелейная станция находится в южном полушарии, то уравнения (1) — (3) выражаются иначе, но результаты [уравнения (7) и (8)] идентичны.

Нужно заметить, что, когда S равен нулю, выражение (8), приведенное выше, эквивалентно выражению (8) в основном тексте Отчета 393.

Примечание 4. — Компьютерная программа для расчета разделяющих углов на основе данного приложения описана в [МККР, 1986—1990].

ССЫЛКА

Документы МККР

4/274—9/263 + ADD.1 (Япония).

ОТЧЕТ 791-1

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОС ЧАСТОТ МЕЖСПУТНИКОВОЙ СЛУЖБОЙ, ФИКСИРОВАННОЙ И ПОДВИЖНОЙ СЛУЖБАМИ

(Вопрос 32/4 и 17/9)

(1978—1982)

1. Введение

БАКР-79 распределила следующие полосы частот для совместного использования межспутниковой службой, фиксированной и подвижной службами: 22,5—23,55; 54,25—58,2; 59—64; 116—126; 126—134; 170—182 и 185—190 ГГц. В некоторых из этих полос совмещение облегчается вследствие затухания, возникающего из-за поглощения парами воды и атмосферными газами. В других полосах такое затухание, однако, не столь велико, и чтобы гарантировать успешное совмещение, следует прибегать к другим мерам.

В настоящем Отчете исследуется возможность совместного использования полос частот межспутниковой службой, фиксированной и подвижной службами.

2. Атмосферное затухание

Межспутниковой службе распределены части радиочастотного спектра вблизи линий поглощения атмосферного кислорода и водяного пара. Поглощение падающей волны атмосферными газами вызывается резонансом молекулярных электрических и магнитных диполей. Кислород и водяной пар являются единственными газами, создающими значительное поглощение в полосах частот межспутниковой службы.

В полосах частот 54,25—58,2; 59—64 и 105—130 ГГц поглощение вызывается главным образом магнитным взаимодействием диполя кислорода с падающей волной. В полосах частот 170—182 и 185—190 ГГц поглощение вызывается взаимодействием электрического диполя водяного пара с падающей волной (см. Отчет 719, рис. 2 и 4).

Зависимость атмосферного затухания от частоты получила свою оценку и нашла свое отражение в Отчете 719. Теоретические значения затухания в зените * волны, проходящей от уровня моря через атмосферу, обобщенно представлены в таблице I. Приведенным значениям соответствует средняя концентрация воды в атмосфере, равная $7,5 \text{ г/м}^3$ (атмосфера средней влажности). Затухание, вызываемое молекулами водяного пара (H_2O), присутствующего в атмосфере, можно рассматривать лишь как грубую оценку действительного затухания вследствие большого разброса содержания воды в разных климатических зонах.

ТАБЛИЦА I — Затухание в зените в полосах частот для межспутниковой связи

Полосы частот для межспутниковой связи (ГГц)	Затухание в зените L_z (дБ)	Примечания
22,55—23,55 54,25—58,2	от 0 до 1,5 от 11 до 150	Затухание зависит от относительной влажности Затухание увеличивается в полосе 54,25—58,2 ГГц приблизительно линейно
59—64	100 +	Затухание быстро изменяется вблизи линий кислорода при максимальных значениях приблизительно до 240 дБ
105—130	от 1,3 до 100 + до 1,9	Затухание увеличивается от 1,3 дБ на частоте 105 ГГц до 100 + дБ на частоте 118,8 ГГц (линия поглощения кислорода), затем падает до 1,9 дБ на частоте 130 ГГц
170—182	от 7,0 до 80 ⁽¹⁾	Затухание возрастает от 7,0 до 80 дБ при концентрации водяного пара $7,5 \text{ г/м}^3$
185—190	от 80 до 13 ⁽¹⁾	Затухание линейно уменьшается от 80 до 13 дБ при концентрации водяного пара $7,5 \text{ г/м}^3$

⁽¹⁾ Допущение: средняя атмосфера с концентрацией водяного пара на поверхности Земли $7,5 \text{ г/м}^3$.

В Отчете 719 рассматриваются теоретические значения затухания в одном направлении для наземных станций, расположенных на различных высотах до уровня моря. Расчеты, произведенные Ребером и др. (1970 г.), также показывают, что форма кривой поглощения вблизи 60 ГГц изменяется с изменением высоты над уровнем моря от широкой гладкой кривой на уровне моря до одной из отдельных линий (резонансы частоты O_2), отвечающих различным высотам над уровнем моря. Это явление выражается областями низкого затухания между резонансными частотами O_2 на высотах более 5 км.

Суммарное затухание падающей волны, проходящей через атмосферу, может быть выражено через затухание в зените (вертикальный путь распространения) и угол пути распространения волны над горизонтом [Отчет 74-43 ОТ, 1974 г.]. Для углов места θ , превышающих примерно 5° , затухание в атмосфере (L_a) связано с затуханием в зените (L_z) простым соотношением:

$$L_a = L_z \operatorname{cosec} \theta. \quad (1)$$

3. Изоляция между наземными станциями и спутниками

Поскольку спутники всегда отделены от наземных станций какой-то частью атмосферы, затухание вследствие атмосферного поглощения добавляется к затуханию в свободном пространстве, что способствует изоляции упомянутых служб. Например, потери вследствие атмосферного поглощения на пути распространения от поверхности Земли до верхних границ атмосферы превосходят 100 дБ на частоте 60 ГГц. Потери от затухания в свободном пространстве на пути распространения от геостационарной орбиты до ближайшей точки на поверхности Земли составляют примерно 220 дБ. Таким образом, изоляция между фиксированной или подвижной станцией, находящейся на поверхности Земли, и спутниковой станцией на геостационарной орбите на частоте 60 ГГц составляет 320 дБ или более.

* Относится к волне, распространяющейся вертикально из точки на поверхности Земли.

Мощность, передаваемая от наземной станции на спутник, оценивается через спектральную плотность мощности помехи на входе спутникового приемника. Уровень спектральной плотности мощности, создаваемой наземной станцией на входе спутникового приемника, выраженный в дБ (Вт/кГц), определяется из уравнения:

$$I = P_t + G_{t(0)} + G_{R(\varphi)} - L, \quad (2)$$

где:

- P_t : спектральная плотность мощности передатчика наземной станции в дБ (Вт/кГц);
 $G_{t(0)}, G_{R(\varphi)}$: соответствующие усиления наземной и спутниковой антенн на трассе помехи в дБ (включая потери на согласование и потери в фидере);
 L : потери на пути распространения от наземной до спутниковой станции в дБ.

Потери на пути распространения (L) включают потери в свободном пространстве (L_s), потери из-за атмосферного поглощения (L_a) и метеорологические потери (L_M).

Уровень помех в любой спутниковой линии может быть оценен путем использования уравнения (2) и геометрических соотношений, характеризующих пути распространения сигнала и помехи. Оценивая уравнение (2) с использованием только потерь в свободном пространстве (L_s) и сравнивая результат с допустимым уровнем помехи, можно определить величину изоляции, требуемую для совместного использования полос частот.

Для спутников на негеостационарных орбитах степень воздействия помехи будет зависеть от времени, в течение которого спутник находится в зоне видимости для наземного передатчика. На линиях, спутники которых находятся на хаотически рассеянных орбитах, помехи (если таковые имеются) будут носить переходящий характер и вероятность превышения критерия помех будет чрезвычайно мала.

4. Совместное использование частот фиксированной и подвижной службами с межспутниковой службой, использующей геостационарные спутники

4.1 Введение

Статья 27 Регламента радиосвязи определяет пределы максимальной мощности, излучаемой в фиксированной или подвижной службах, использующих совместные полосы частот выше 1 ГГц с космическими службами радиосвязи. В пункте 2505 указывается: «Максимальная эквивалентная изотропно излучаемая мощность станции фиксированной или подвижной службы не должна превышать +55 дБВт».

В Статье 27 определяются также пределы мощности в антенне фиксированной или подвижной станции, совместно использующей полосы частот выше 10 ГГц с космическими службами радиосвязи. В пункте 2508 * указывается: «Мощность, подводимая к антенне передатчиком станции фиксированной или подвижной службы в полосах выше 10 ГГц, не должна превышать +10 дБВт».

Исходя из пункта 2505* и полагая, что спектральная плотность мощности равномерна в полосе 4 кГц, можно из уравнения (2) найти спектральную плотность мощности помехи:

$$I = 49 \text{ дБ(Вт/кГц)} + G_{R(\varphi)} - L. \quad (3)$$

Это уравнение предполагает, что основной луч наземного передатчика направлен на спутник.

Для определения значений максимально допустимой плотности потока мощности шумоподобной помехи или суммарной мощности помехи непрерывного вида следует пользоваться пределом, указанным в Отчете 548 для приемников необитаемого космического корабля, работающих на частотах ниже 15 ГГц. Этим пределом предусматривается, что уровень помехи на входе приемника, равный —161 дБ(Вт/кГц) и не превышаемый в течение более чем 0,1% времени, является приемлемым для необитаемых космических кораблей. Данный критерий основан на следующих допущениях:

- рабочая шумовая температура, ограниченная теплом Земли, составляет 600 К [—201 дБ(Вт/Гц)];
- полоса детектирования на спутнике составляет больше 1 кГц (30 дБ), поскольку необходимо быстрое автоматическое распознавание сигналов.

Отношение помеха/шум для 0,1% времени, используемое в вышеприведенном критерии, соответствует 10 дБ. Следовательно:

$$\text{Помеха (0,1\%)} = -201 \text{ дБ(Вт/Гц)} + 30 \text{ дБ} + 10 \text{ дБ} = -161 \text{ дБ(Вт/кГц)}.$$

* Хотя пункт 2510 Регламента радиосвязи ограничивает область применения пунктов 2505 и 2508 конкретными распределениями частот ниже 40 ГГц, в последующем анализе предполагается, что они применимы также и на частотах выше 40 ГГц.

Требуемое усиление приемной антенны $G_{R(\varphi)}$ для межспутниковой линии определяется потерями на трассе между спутниками и способностью спутников оставаться в пределах используемой ширины луча на уровне 3 дБ (удержание станции). В более раннем исследовании (Отчет 451) эти требования были проанализированы и было установлено, что максимальный диаметр антенны 1,2 м определяется размерами обтекателя спутника при запуске. В настоящем Отчете максимальное значение усиления приемной антенны $G_{R(\varphi)}$ рассчитывается, исходя из этого диаметра. Результирующее значение усиления (54,7 дБ на частоте 60 ГГц для кип антенны, равного 55%) должно приближаться к максимальному для любой практической антенной системы, которая будет использоваться в межспутниковой службе.

4.2 Помехи межспутниковой службе от фиксированной и подвижной служб

При пределах э.и.и.м. и пределах мощности, указанных в пункте 4.1, уровень помех на входах приемников межспутниковой линии, создаваемых излучением наземных станций, будет зависеть от усиления антенн межспутниковой линии в направлении на край Земли. Если такая помеха должна иметь приемлемо малое значение, то усиление антенны межспутниковой линии в этом направлении также должно быть ограничено. Это обстоятельство выдвигает другое условие — насколько близко к краю Земли могут быть направлены антенны межспутниковой линии и, как следствие, каким может быть максимальный допустимый орбитальный разнос спутников, входящих в состав линии.

Например, если требуется, чтобы величина максимально допустимой единичной помехи на входе приемника межспутниковой линии была на 15 дБ ниже шума системы в полосе, определяемой по правилу Карсона, то усиление антенны межспутниковой линии в направлении края, $G(\theta)$, определяется выражением:

$$E_T - L + G(\theta) = 10 \log (kT_s B) - 15, \quad (4)$$

где

E_T : максимальная допустимая э.и.и.м. наземной станции (55 дБВт);

L : потери в свободном пространстве на пути распространения помехи (213 дБ на частоте 25 ГГц);

T_s : шумовая температура системы (1000 К);

B : ширина полосы межспутниковой линии, определяемая по правилу Карсона (780 МГц).

При численных значениях, приведенных в скобках для иллюстрации, межспутниковая линия будет защищена до желаемой степени, если

$$G(\theta) \leq 33,5 \text{ дБ.}$$

Для того чтобы оценить, как это влияет на геометрические соотношения межспутниковой линии, предположим снова, что характеристика антенны межспутниковой линии соответствует огибающей боковых лепестков, приведенной в Отчете 558. Для межспутниковой линии, описанной в таблице II (разнос спутников 10° , $G_m = 50$ дБ, $\theta_0 = 0,25^\circ$,

где

G_m : максимальное усиление антенны межспутниковой линии,

θ_0 : половина ширины луча на уровне 3 дБ антенны межспутниковой линии),

угол, под которым антенна межспутниковой линии не должна направляться на край Земли, с тем чтобы избежать помехи от наземных передатчиков, будет

$$\theta_{min} = 0,59^\circ.$$

Этот защитный угол представлен на рис. 1.

4.3 Помехи фиксированной и подвижной службам от межспутниковой службы

Критерий защиты фиксированной и подвижной служб от межспутниковой службы можно оценить, предположив, что значения плотности потока мощности, применимые к полосе 17,7—19,7 ГГц, пригодны также для полос частот, используемых на совместной основе фиксированной, подвижной и межспутниковой службами. Вышеупомянутые значения определены в пунктах 2578 и 2580 Регламента радиосвязи следующим образом:

$$\begin{aligned} & - 115 \text{ дБ(Вт/(м}^2 \cdot \text{МГц))} && \text{для } 0^\circ < \delta < 5^\circ, \\ & - 115 + (\delta - 5)/2 \text{ дБ(Вт/(м}^2 \cdot \text{МГц))} && \text{для } 5^\circ < \delta < 25^\circ, \\ & - 105 \text{ дБ(Вт/(м}^2 \cdot \text{МГц))} && \text{для } 25^\circ < \delta < 90^\circ, \end{aligned}$$

где δ — угол прихода излучения.

Можно показать, что значения плотности потока мощности на поверхности Земли, создаваемые межспутниковой линией, имеющей характеристики, приведенные в таблице II, будут в действительности значительно ниже вышеприведенных значений.

Для доказательства заметим, что в условиях распространения в свободном пространстве плотность потока мощности помехи, создаваемой межспутниковой линией на поверхности Земли, описывается выражением:

$$P_{ISL} + G(\theta) - 162 \text{ (дБ(Вт/(м}^2 \cdot \text{МГц))),} \quad (5)$$

где

P_{ISL} : максимальная плотность мощности передатчика межспутниковой линии (дБ(Вт/МГц));

$G(\theta)$: усиление антенны межспутниковой линии в направлении на край Земли (дБ).

Приняв значение плотности потока мощности равным — 115 дБ(Вт/м² · МГц) и предположив, что P_{ISL} по крайней мере на 10 дБ ниже общего значения мощности передатчика межспутниковой линии, равного 10 Вт, как показано в примере в пункте 1, получим, что $G(\theta)$ не должно превышать 47 дБ.

Для того чтобы установить, насколько близко к краю Земли может быть направлена антенна межспутниковой линии, предположим, что диаграмма антенны межспутниковой линии удовлетворяет огибающей боковых лепестков, определенной в Отчете 558 для бортовой антенны спутника, работающего в фиксированной спутниковой службе:

$$G(\theta) = \begin{cases} G_m - 3 (\theta/\theta_0)^2 \text{ дБ} & \text{для } 1 \leq \theta/\theta_0 \leq 2,6 \\ G_m - 20 \text{ дБ} & \text{для } 2,6 < \theta/\theta_0 \leq 6,3 \\ G_m - 25 \log (\theta/\theta_0) \text{ дБ} & \text{для } 6,3 < \theta/\theta_0 \leq \theta_1/\theta_0 \\ -10 \text{ дБ} & \text{для } \theta > \theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

где

θ : угол между осью антенны межспутниковой линии и краем Земли;

G_m : максимальное усиление антенны межспутниковой линии (дБ);

θ_0 : половина ширины луча на уровне 3 дБ антенны межспутниковой линии;

θ_1 : значение θ при $G(\theta) = -10$ дБ.

Полагая $G(\theta)$ равным 47 дБ и принимая $\theta_0 = 0,25^\circ$, как показано в примере в пункте 4.2, получим, что минимальный угол, под которым антенна межспутниковой линии не должна направляться на край Земли, с тем чтобы избежать помехи наземным приемникам, составляет всего

$$\theta_{\min} = 0,25^\circ$$

Это является незначительным ограничением для геометрии межспутниковой линии. Орбитальный разнос между спутниковыми станциями и межспутниковой линией составляет

$$\varphi = 162,8 - 2 \theta \quad \text{градусов,} \quad (7)$$

где, как и раньше, θ — угол между осью антенны межспутниковой линии и краем Земли. Таким образом, условие, накладываемое на θ пределом плотности потока мощности, равным — 115 дБ(Вт/(м² · МГц)), заключается в уменьшении максимально допустимого орбитального разноса всего лишь примерно на полградуса по сравнению с тем значением разноса, которое определяется самим фактом присутствия Земли (см. рис. 1).

ТАБЛИЦА II — Предполагаемые характеристики межспутниковой линии

Выходная мощность ретранслятора (Вт)	10
Ширина луча антенны на уровне половины мощности (в градусах)	≈ 0,5, независимо от частоты
Усиление антенны (дБ)	≈ 50, независимо от частоты
Шумовая температура системы (К)	1000 (Черное небо)
Наивысшая модулирующая частота (МГц)	130
Пиковая девиация частоты сигнала (МГц)	260
Ширина ВЧ полосы, определенная по правилу Карсона (МГц)	780

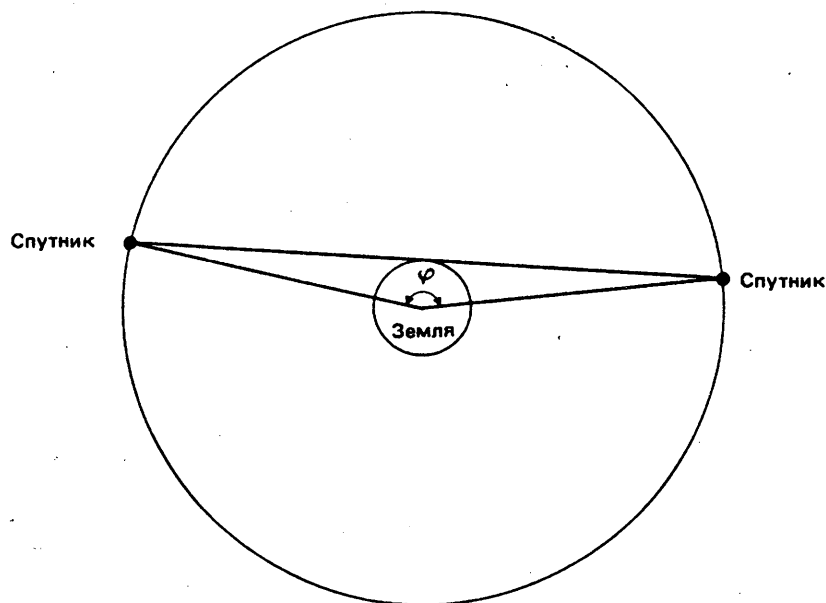


РИСУНОК 1 — Максимально возможный разнос между спутниками межспутниковой линии, необходимый для того, чтобы избежать помех

$\varphi_{\text{тах}}$ необходимый для того, чтобы межспутниковый луч не касался Земли: $162,8^\circ$;

$\varphi_{\text{тах}}$ необходимый для исключения помех фиксированной и подвижной службам:

$$162,8^\circ - 2\theta_f = 162,8^\circ - 2(0,25^\circ) = 162,3^\circ;$$

$\varphi_{\text{тах}}$ необходимый для того, чтобы избежать помех межспутниковым линиям:

$$162,8^\circ - 2\theta_l = 162,8^\circ - 2(0,59^\circ) = 161,62^\circ.$$

Наименьшее значение $161,62^\circ$ является искомым разномом.

5. Заключение

Первое поколение межспутниковых линий будет, возможно, использовать частоты ниже примерно 40 ГГц. В предыдущих исследованиях [Welti, 1976 и 1977] альтернативных методов передачи отдавалось предпочтение использованию на таких линиях повторной ЧМ. При этом для межспутниковых линий емкостью порядка 2000 дуплексных телефонных каналов указывались полосы радиочастот шириной порядка 1 ГГц в каждом направлении передачи.

При принятии простого критерия совмещения, уже применяемого в близких полосах частот (см. пункт 4.3), представляется возможным равноправное совместное использование частот межспутниковыми линиями, имеющими характеристики, представленные в таблице II, и фиксированными и подвижными службами в полосах частот около 25 ГГц без необходимости каких-либо существенных проектных ограничений на системы в любой из этих служб. В полосах более высоких частот, распределенных межспутниковой, фиксированной и подвижной службам, дополнительная изоляция вследствие атмосферного затухания обеспечит даже большие запасы для совместного использования частот.

ССЫЛКИ

- OT Report 74—43 [1974] A survey of Earth-to-satellite propagation factors between 2.5 and 275 GHz. US Dept. of Commerce, Office of Telecommunications, Institute for Telecommunications Science, Boulder, Colo., USA.
- REBER, E. E., MITCHELL, R. L. and CORBER, C. J. [July, 1970] Attenuation of 5 mm wavelength band in a variable atmosphere. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 472—479.
- WELTI, G. R. [December, 1976] Inter-satellite link technology. COMSAT Labs. Tech. Rep. CL-TR-2-76.
- WELTI, G. R. [December, 1977] Inter-satellite link for distributed primary satellites. COMSAT Labs. Tech. Rep. CL-TR-3-77.

ЛИТЕРАТУРА

Документы МККР

[1978-82]: 4/14 (США); 9/113 (США).

РАЗДЕЛ 4/9 В: КООРДИНАЦИЯ И РАСЧЕТЫ ПОМЕХ

ОТЧЕТ 382-6*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАЦИОННОЙ ЗОНЫ

(Вопросы 32/4 и 17/9)

(1966—1970—1974—1978—1982—1986—1990)

Предварительное замечание

а) Настоящий Отчет содержит определенные данные по распространению радиоволн, приведенные в Отчетах 724, 563 и 569. Некоторые из этих данных являются по своему характеру предварительными, и, следовательно, данный Отчет в настоящее время не предлагается в качестве основы для внесения каких-либо изменений в Регламент радиосвязи. Просьба к администрациям провести сравнение результатов, полученных с использованием этого Отчета, включая приложение к нему, с методами, содержащимися в Приложении 28 Регламента радиосвязи, и направить результаты такого сравнения в МККР. Формат сравнения должен соответствовать примеру, приведенному в [МККР, 1986-90а].

б) Все более широкое внедрение цифровых спутниковых и радиорелейных систем связи диктует необходимость существенной переработки Отчета 382. В такую переработку было бы необходимо включить, среди прочего, пересмотр коэффициента J и “запаса по помехе” M_0 (p_0) при использовании цифровых систем с учетом условий распространения по моде (1) до 20% времени.

1. Введение

В данном Отчете описывается процедура определения координационной зоны вокруг приемной или передающей земной станции, работающей в полосах частот между 1 и 40 ГГц, используемых совместно космическими и наземными службами радиосвязи. Процедура, описанная в данном Отчете, аналогична, но не обязательно идентична процедуре, приведенной в Приложении 28 Регламента радиосвязи. В частности, § 3, 4, 6 и приложение II к данному Отчету могут отличаться от соответствующих частей Приложения 28 с учетом последних данных, полученных МККР в отношении распространения радиоволн.

Описываемая здесь процедура подходит для определения координационной зоны в полосах частот, в которых фиксированная спутниковая служба имеет распределения в одном направлении (Земля — космос или космос — Земля). Процедура, которой необходимо следовать в полосах частот, распределенных фиксированной спутниковой службой в двух направлениях (то есть Земля — космос и космос — Земля) и используемых совместно с наземными службами, находится в стадии изучения (см. Исследовательскую программу 17F/9). Элементы процедуры, описанной в данном Отчете, применимы также для определения координационной зоны вокруг передающей земной станции относительно приемной земной станции в полосах частот, распределенных ФСС в двух направлениях (см. Отчет 999).

Работа передающих и приемных земных и наземных станций в совместно используемых полосах частот между 1 и 40 ГГц может привести к возникновению помех между станциями этих служб. Величина таких помех зависит от потерь передачи на трассе распространения помехи, которые, в свою очередь, зависят от таких факторов, как протяженность и общая геометрия трассы распространения помехи (например, экранирование местности), направленных свойств антенн, радиоклиматических условий и процента времени, в течение которого должно происходить превышение потерь передачи.

Цель данного Отчета — представить метод определения расстояния для всех азимутальных направлений относительно какой-либо передающей и/или приемной земной станции, за пределами которого, как предполагается, потери передачи постоянно превышают заданный допустимый уровень, за исключением заданного допустимого процента времени. Определяемое таким образом расстояние называется “координационным расстоянием”, и крайние точки координационных расстояний, определенных для всех азимутальных направлений,

* Данный Отчет следует довести до сведения 5-й Исследовательской комиссии.

составляют контур вокруг земной станции — координационный контур, который включает в себе координационную зону. При правильном выборе допустимых потерь передачи и соответствующих процентов времени, в течение которого эти потери не должны превышать, наземные станции, расположенные вне координационной зоны, будут воспринимать или создавать лишь незначительные помехи.

Координационная зона определяется путем нахождения координационного расстояния для всех азимутальных направлений от земной станции и изображения в масштабе на соответствующей карте координационного контура, который представляет собой границу координационной зоны. В данном Отчете приводятся методы, которые пригодны либо для графического, либо для компьютерного определения координационной зоны.

Хотя «координационное расстояние» основано на технических данных, это понятие носит административный характер. Поскольку координационная зона определяется до детального рассмотрения любого конкретного случая возможных помех, она в силу обстоятельств должна основываться на предполагаемых параметрах наземных систем, в то время как соответствующие параметры земных станций известны. Таким образом, чтобы не затруднить техническое развитие наземных систем, их предполагаемые параметры должны браться с некоторым превышением по отношению к тем параметрам, которые используются в настоящее время.

Следует подчеркнуть, что наличие или установка наземной станции в пределах координационной зоны земной станции может повлиять, хотя обычно не влияет, на успешную работу как земной, так и наземной станций, поскольку процедура определения координационной зоны основана на весьма неблагоприятных предположениях относительно взаимных помех.

В целях определения координационной зоны могут рассматриваться два случая:

- для земной станции, которая работает на передачу (и, следовательно, может создать помеху приему на наземной станции);
- для земной станции, которая работает на прием (и, следовательно, может подвергаться помехе от излучения наземной станции).

В том случае, когда земная станция предназначена для передачи или приема излучений различных классов, используемые при определении координационного контура параметры земной станции должны обеспечивать наибольшее координационное расстояние для каждого луча антенны земной станции и для каждой распределенной полосы частот, которую земной станции предлагается использовать совместно с наземными службами.

Предлагается, чтобы совместно с координационным контуром были начерчены несколько вспомогательных контуров, основанных на менее неблагоприятных предположениях по сравнению с теми, которые были применены для определения координационного контура. Эти вспомогательные контуры можно использовать для исключения из дальнейшего рассмотрения, без более детальных расчетов, некоторых существующих или планируемых наземных станций, расположенных в пределах координационной зоны.

В разделе 7 Отчета 453 описываются средства, позволяющие увеличить наклонение геосинхронной орбиты с соответствующим увеличением отклонений от номинального экваториального расположения в направлении север — юг.

Координационная зона земных станций, работающих со спутниками, использующими этот маневр, должна быть определена для минимального результирующего угла места при расчете условий распространения по моде (1). Необходимо дальнейшее изучение результатов использования моды (2), однако первоначальное рассмотрение дает основание предполагать, что координационное расстояние существенно не изменится, хотя вероятность пересечения луча с координационной зоной увеличится.

2. Общие соображения

2.1 Концепция минимальных допустимых потерь передачи

Определение координационного расстояния как расстояния от земной станции, за пределами которого вредные помехи от наземной станции или для нее могут считаться незначительными, основано на предположении, что затухание нежелательного сигнала является равномерно возрастающей функцией расстояния или может быть представлено такой функцией.

Величина требуемого затухания между мешающим передатчиком и испытывающим помеху приемником дается в виде «минимальных допустимых потерь передачи для $p\%$ времени», то есть потерь передачи, которые должны превышать реальными или расчетными потерями передачи все время, кроме $p\%$ времени*:

$$L(p) = P_t - P_r(p) \quad \text{дБ}, \quad (1)$$

где

P_t^{**} : максимальный имеющийся уровень мощности передачи (дБВт) в эталонной полосе частот на входе антенны станции, создающей помеху;

$P_r(p)$: допустимый уровень мешающего излучения (дБВт) в эталонной полосе частот, который может быть превышен в течение не более чем $p\%$ времени на выходе приемной антенны станции, подверженной помехе, имея в виду, что мешающее излучение поступает от единичного источника.

P_t и $P_r(p)$ определяются для одной и той же ширины полосы радиочастот (эталонная ширина полосы частот), а $L(p)$ и $P_r(p)$ определяются для одного и того же процента времени, как это требуется критериями качества передачи, осуществляемой системой, подверженной помехе.

В данном случае представляют интерес только малые проценты времени, и при этом следует различать два существенно отличных механизма распространения мешающего излучения:

- распространение сигналов в тропосфере по трассам, близким к дуге большого круга; мода (1), см. § 3;
- распространение сигналов из-за рассеяния от гидрометеоров; мода (2), см. § 4.

2.2 Концепция минимальных допустимых основных потерь передачи

В случае распространения по моде (1) потери передачи определяются в виде отдельных параметров, а именно: основных потерь передачи (то есть затухание между изотропными антеннами) и эффективных усиления антенн на обоих концах трассы прохождения помехи. Минимальные допустимые основные потери передачи тогда могут быть выражены следующим образом:

$$L_b(p) = P_t + G_t + G_r - P_r(p) \quad \text{дБ}, \quad (2)$$

где

$L_b(p)$: минимальные допустимые основные потери передачи (дБ) для $p\%$ времени; эта величина должна превышать реальными или расчетными основными потерями передачи все время, кроме $p\%$ времени;

G_t : усиление (в дБ относительно изотропного излучателя) передающей антенны мешающей станции. Если помеху создает земная станция, то берется усиление антенны в направлении физического горизонта по азимуту наземной станции; для наземной станции берется предполагаемое максимальное усиление антенны;

G_r : усиление (в дБ относительно изотропного излучателя) приемной антенны станции, подверженной помехе. Если помехе подвержена земная станция, то берется усиление антенны в направлении физического горизонта по азимуту наземной станции; для наземной станции берется предполагаемое максимальное усиление антенны.

Сведения о диаграммах направленности антенн земных станций содержатся в Рекомендации 465 и Отчетах 391 и 614. Приложение I дает численные и графические методы определения угла между основным лучом антенны земной станции и физическим горизонтом, а также усиление антенны в направлении на горизонт в зависимости от азимута.

В случае спутников на слегка наклонных геостационарных орбитах воздействие на координатный контур земной станции будет зависеть от изменений в углах привязки земной станции по месту и азимуту. В одном из исследований показано, что эти углы могут быть получены из уравнений раздела 3.2 Отчета 1142 [МККР, 1986-90b].

* Если p представляет собой малый процент времени в пределах от 0,001 до 1,0%, то используется термин «кратковременные»; если $p \geq 20\%$, то используется термин «долговременные».

** Штрихом отмечены параметры, связанные с создающей помеху станцией.

При рассмотрении негеостационарных спутников надо иметь в виду, что G_r или G_t (в зависимости от того, что относится к антенне земной станции) меняются во времени. В этом случае следует пользоваться эквивалентной независимой от времени величиной усиления антенны земной станции*. Эта эквивалентная величина усиления либо на 10 дБ меньше максимального усиления антенны в направлении на горизонт, либо является той величиной усиления антенны в направлении на горизонт, которая превышает в течение не более чем 10% времени (если превышение имеет место), в зависимости от того, какая из этих величин больше.

2.3 Определение и табулирование параметров помехи

2.3.1 Допустимый принимаемый уровень мешающего излучения

Допустимый принимаемый уровень мешающего излучения (дБВт) в эталонной ширине полосы частот, превышаемый в течение не более чем $p\%$ времени на выходе приемной антенны станции, подверженной помехе, от каждого источника помехи, определяется приведенной ниже общей формулой:

$$P_r(p) = 10 \log(kT_e B) + J + M(p) - W \quad \text{дБВт}, \quad (3)$$

где

$$M(p) = M(p_0/n) = M_0(p_0) \quad \text{дБ} \quad (4)$$

при

k : постоянная Больцмана, $1,3 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

T_e : температура тепловых шумов приемной системы (К) на выходе приемной антенны (см. примечание 1);

B : эталонная ширина полосы частот (Гц), то есть ширина полосы частот системы, подверженной помехе, в пределах которой мощность мешающего излучения может быть усреднена;

J : отношение (дБ) допустимой долговременной (20% времени) мощности мешающего излучения к мощности тепловых шумов приемной системы на выходе приемной антенны, принимающей помеху (см. примечание 2);

p_0 : процент времени, в течение которого помеха от всех источников может превысить допустимый уровень;

n : ожидаемое количество источников помех, предполагающихся некоррелированными для малых процентов времени (см. § 4.3.2 Отчета 887);

p : процент времени, в течение которого помеха от одного источника может превысить допустимый уровень; поскольку появление помех одновременно считается маловероятным, $p = p_0/n$;

$M_0(p_0)$: отношение (дБ) между суммарным допустимым уровнем мощности всех мешающих излучений (все источники), превышаемым в течение $p_0\%$ времени, и таким же уровнем, превышаемым в течение 20% времени (см. примечание 3);

$M(p)$: отношение (дБ) между допустимым уровнем мощности одного мешающего излучения (единичный источник), превышаемым в течение $p\%$ времени, и суммарным допустимым уровнем мощности всех мешающих излучений (все источники), превышаемым в течение 20% времени;

W : коэффициент эквивалентности (дБ), связывающий помеху от мешающих источников с помехой, вызываемой введением в эталонную ширину полосы частот дополнительного теплового шума такой же мощности. Этот коэффициент положителен, если мешающие излучения приводят к большему ухудшению качества, чем тепловые шумы (см. примечание 4).

В таблицах I и II представлены величины вышеуказанных параметров.

* Эта эквивалентная величина усиления антенны не может быть использована, если антенна земной станции нацелена в одном и том же направлении в течение значительных периодов времени (например, при работе с космическими зондами или со спутниками, которые почти геостационарны).

ТАБЛИЦА I — Параметры, необходимые для определения координационной зоны для передающей земной станции

Тип наземной станции		Станция радиорелейной линии прямой видимости					Станция тропосферной радиорелейной линии
Полосы частот (ГГц) ^(б)		1—10		10—15		15—40	1—10
Вид модулирующего сигнала наземной станции ⁽¹⁾		A	N	A	N	N	A
Параметры и критерии помехи	p_0 (%)	0,01	0,005	0,01	0,005	0,005	0,01
	n	2	3	2	2	2	1
	p (%)	0,005	0,0017	0,005	0,0025	0,0025	0,01
	J (дБ) ⁽²⁾	16	2	16	2	2	9
	$M_0(p_0)$ (дБ) ⁽³⁾	17	33	17	22	22	17
	W (дБ) ⁽⁴⁾	0	0	0	0	0	0
Параметры наземной станции	B (Гц)	4×10^3	10^6	4×10^3	10^6	10^6	4×10^3
	G_r (дБ) ⁽⁵⁾	45 ⁽⁷⁾	45 ⁽⁷⁾	50	50	50	52
	ΔG (дБ)	3 ⁽⁷⁾	3 ⁽⁷⁾	8	8	8	10
	T_e (К)	750	750	1500	1500	3200	500
Вспомогательные параметры	S (дБВт)	176 ⁽⁸⁾	150 ⁽⁸⁾	178	157	154	192
	$P_r(p)$ (дБВт) в полосе B	—131	—105	—128	—107	—104	—140

⁽¹⁾ А: Аналоговая модуляция, N: Цифровая модуляция.

В тех случаях, когда на наземной станции применяется как аналоговый, так и цифровой виды модулирующего сигнала, следует использовать те параметры, которые приводят к получению большей координационной зоны.

⁽²⁾ В примечании 2 к пункту 2.3.1 определяется и рассматривается величина параметра J как для аналоговых, так и для цифровых систем. В Рекомендации 615 содержатся критерии помех для цифровых радиорелейных систем; величина J для цифровых систем требует дальнейшего исследования совместно с величинами p_0 (%) и n .

⁽³⁾ и ⁽⁴⁾: См. примечания 3 и 4 к пункту 2.3.1.

⁽⁵⁾ Величины G_r не включают потери в фидерных линиях.

⁽⁶⁾ Распределенные полосы частот приведены в Приложении 28 к Регламенту радиосвязи.

⁽⁷⁾ Приведена величина для 6 ГГц. Соответствующие величины для других частот даются в таблице I bis.

⁽⁸⁾ Приведенные величины относятся к частоте 6 ГГц, величины для других частот могут быть получены из таблицы I bis. В отношении определения параметра S см. пункт 2.3.2.

ТАБЛИЦА I bis

Частоты (ГГц)	1,5	2	4	6	7-8
G_r (дБ)	35	37	42	45	47
ΔG (дБ)	—7	—5	0	3	5

ТАБЛИЦА II — Параметры, необходимые для определения координационной зоны для приемной земной станции

Службы космической радиосвязи		Фиксированная спутниковая служба					Служба космических исследований		Метеорологическая спутниковая служба ⁽⁹⁾	Служба космической эксплуатации (телеметрия) ⁽⁹⁾	Спутниковая служба исследования Земли ⁽⁹⁾	
							около-земная	глубокий космос и пилотируемые полеты				
Полосы частот (ГГц) ⁽⁶⁾		1—10		10—15		15—40	1—10	1—10	1—15	1—10	1—10	10—40
Вид модулирующего сигнала ⁽¹⁾	Земная станция	A	N	A	N	N	—	—	—	—		
	Наземная станция	A	A	A	A	N	A	A	A	A		
Параметры и критерии помехи	p_0 (%)	0,03	0,003	0,03	0,003	0,003	0,1	0,001			1,0	
	n	3	3	2	1	1	2	1				
	p (%)	0,01	0,001	0,015	0,003	0,003	0,05	0,001				
	J (дБ) ⁽²⁾	—8,5	—8,5	—8,5	—8,5	—8,5	—	—				
	$M_0(p_0)$ (дБ) ⁽³⁾	17	≥5	17	≥5	≥5	—	—				
	W (дБ) ⁽⁴⁾	4	0	4	0	0	—	—				
Параметры наземной станции (прямой видимости)	E (дБВт) в полосе B	55	55	55	55	35 ⁽⁷⁾	25 ⁽⁸⁾	25 ⁽⁸⁾	55	55	55	
	P (дБВт) в полосе B	13	13	10	10	—10 ⁽⁷⁾	—17 ⁽⁸⁾	—17 ⁽⁸⁾	13	13	13	
	ΔG (дБ)	0	0	3	3	3	0	0	0	0	0	
Параметры наземной станции (тропосферной)	E (дБВт) в полосе B	92	92	—	—	—	62 ⁽⁸⁾	62 ⁽⁸⁾	92	—	—	
	$P_{f,1}$ (дБВт) в полосе B	40	40	—	—	—	10 ⁽⁸⁾	10 ⁽⁸⁾	40	—	—	
	ΔG (дБ)	10	10	—	—	—	10	10	10	—	—	
Эталонная ширина полосы частот	B (Гц) ⁽⁵⁾	10^6	10^6	10^6	10^6	10^6	1	1			10^6	
Допустимая мощность помехи	$P_r(p)$ (дБВт) в полосе B	—	—	—	—	—	—220	—220			—154	

⁽¹⁾ А: Аналоговая модуляция; N: Цифровая модуляция.

⁽²⁾ ⁽³⁾ и ⁽⁴⁾: См. примечания 2, 3 и 4 к пункту 2.3.1.

⁽⁵⁾ В некоторых системах фиксированной спутниковой службы может оказаться желательным выбор большей эталонной ширины полосы частот B , если потребности системы указывают на то, что такой выбор может быть произведен. Однако выбор более широкой полосы частот приведет к меньшему координационному расстоянию, и последующее решение уменьшить эталонную ширину полосы частот может потребовать дополнительной координации земной станции. Может также оказаться желательным уменьшить величину эталонной ширины полосы частот; например, при узкополосных передачах эталонная ширина полосы частот B может быть принята равной узкой ширине полосы частот, занимаемой желательной передачей.

⁽⁶⁾ Распределенные полосы частот приведены в Приложении 28 к Регламенту радиосвязи.

⁽⁷⁾ Эти величины предполагают ширину полосы радиочастот не менее 100 МГц и на 20 дБ ниже предполагаемой суммарной мощности, приходящейся на каждое излучение.

⁽⁸⁾ Эти величины определены для ширины полосы частот в 1 Гц и на 30 дБ ниже предполагаемой суммарной мощности, приходящейся на каждое излучение.

⁽⁹⁾ Параметры, связанные с этими службами, могут меняться в довольно широких пределах. Необходимо провести дальнейшие исследования для того, чтобы получить характерные величины.

В определенных случаях администрация может посчитать оправданным некоторое отклонение характеристик ее приемной земной станции от тех величин, которые указаны для земных станций в таблице II. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что для конкретных систем ширина полосы частот B или, например, для систем с предоставлением каналов по требованию, проценты времени p и p_0 могут отличаться от величин, приведенных в таблице II. Более подробные сведения приведены в пункте 2.3.6.

Примечание 1.— Шумовая температура (К) приемной системы, отнесенная к выходу приемной антенны, может быть получена по формуле:

$$T_e = T_a + (e - 1) 290 + eT, \quad \text{К}, \quad (5a)$$

где

T_a : шумовая температура (К), вносимая приемной антенной;

e : численное значение потерь в линии передачи (например, в волноводе) между выходом антенны и входом приемника;

T : шумовая температура (К) входа приемника, включая вклад всех последующих каскадов, пересчитанный на вход приемника.

Для радиорелейных приемников и в том случае, когда потери в волноводной линии приемной земной станции не известны, следует использовать $e = 1,0$.

Примечание 2.— Коэффициент J (дБ) определяется как отношение суммарной долговременной (20% времени) допустимой мощности совокупности всех мешающих излучений к долговременной величине мощности тепловых радиочастотных шумов в эталонной ширине полосы частот для одного приемника. При вычислении этого коэффициента считается, что мешающие излучения имеют равномерное распределение спектральной плотности мощности, причем действительная форма спектра учитывается коэффициентом W (см. ниже). Например, в 50-пролетной наземной гипотетической эталонной цепи суммарная допустимая мощность аддитивной помехи составляет 1000 пВт_{0псф} (Рекомендация 357) и средняя мощность теплового шума для одного пролета может быть принята равной 25 пВт_{0псф}. Следовательно, поскольку для системы с частотным разделением и частотной модуляцией (ЧРК-ЧМ) отношение мощности шума от помехи с равномерным спектром к мощности теплового шума в одной и той же эталонной ширине полосы частот сохраняется одинаковым как до, так и после демодулятора, то величина коэффициента J определяется отношением 1000/25, выраженным в дБ, то есть $J = 16$ дБ. В системе фиксированной спутниковой службы суммарная допустимая мощность помехи от наземных станций также равна 1000 пВт_{0псф} (Рекомендация 356), однако мало вероятно, чтобы тепловые шумы, вносимые линией вниз, превышали 7000 пВт_{0псф}, откуда $J > -8,5$ дБ.

В цифровых системах помеха измеряется и определяется в виде допустимого увеличения коэффициента ошибок. В то время как увеличение коэффициента ошибок аддитивно для эталонных цепей, состоящих из последовательно соединенных участков, радиочастотная мощность мешающего излучения, вызывающая такое увеличение коэффициента ошибок, не аддитивна, поскольку коэффициент ошибок не является линейной функцией отношения сигнал/шум на входе демодулятора или отношения сигнал/помеха. В связи с этим может оказаться необходимой индивидуальная защита каждого приемника. Критерий помехи, необходимый для защиты цифровых передач, еще находится в стадии исследований. Однако Рекомендацией 558 устанавливается, что суммарный принимаемый уровень долговременных нежелательных излучений не должен превышать 10% суммарной мощности шума и помехи на входе демодулятора, которая создает коэффициент ошибок, равный 10^{-6} для сигналов 8-разрядной ИКМ телефонии, принимаемых земной станцией фиксированной спутниковой службы. Предполагая, что мощность теплового шума в таких сигналах не превышает 70% суммарной мощности шума и помехи, коэффициент J может также иметь величину $> -8,5$ дБ.

Для наземных цифровых систем, соответствующих Рекомендации 594, перерыв в результате воздействия шумов и помех составляет 0,054% времени любого месяца при пороговом значении коэффициента ошибок, равном 1×10^{-3} , 10% из которых вызываются помехами от спутниковых систем. Для систем с резервным стволом $J = 2$ дБ. Для систем без резервного ствола $J = 7,5$ дБ. Необходимо продолжить исследование этих вопросов (см. пункт 4.3.1 Отчета 877).

Примечание 3.— $M_0(p_0)$ (дБ) — это «запас на помехи», то есть отношение (в дБ) кратковременного ($p_0\%$) допустимого уровня совокупной мощности всех мешающих излучений к аналогичному долговременному (20%) уровню.

Для аналоговых радиорелейных систем и систем фиксированной спутниковой службы этот коэффициент равен отношению (в дБ) между 50 000 и 1000 пВт_{0псф} (17 дБ).

Что касается цифровых систем, то характеристика качества их работы в большей части районов мира может быть успешно определена в виде процента времени p_0 , в течение которого допускается снижение уровня полезного сигнала до его рабочего порогового значения, определяемого заданным коэффициентом ошибок. При работе системы в условиях отсутствия замираний полезный сигнал будет превышать свой пороговый уровень на величину некоторого запаса M_0 . Чем больше этот запас, тем выше уровень мешающего излучения, которое может снизить до порогового значения качество работы системы, действующей в условиях отсутствия замираний.

Можно показать, что снижение до порогового уровня качества работы системы, действующей в условиях отсутствия замираний, при воздействии на нее повышенного уровня мешающего излучения определяется приблизительно следующим выражением:

$$M_0(p_0) = M_s - J \quad \text{дБ}, \quad (5b)$$

где все параметры выражены в дБ, как это определено выше. Однако величины $M_0(p_0)$, превышающие приблизительно $-10 \log p_0$ дБ (где p_0 — проценты времени), в общем использовать не следует, в особенности при распространении по моде (1) на сухопутных трассах, поскольку при таких больших значениях $M_0(p_0)$ координационные расстояния, определенные лишь для малых процентов времени, могут не обеспечить достаточной защиты для номинальной (20% времени) работы системы, подверженной помехе.

Примечание 4.— Коэффициент W (дБ) — это уровень мощности радиочастотного теплового шума относительно принимаемой мощности мешающего излучения, который, действуя вместо мешающего излучения и занимая такую же (эталонную) ширину полосы частот, создаст такую же помеху (например, увеличение мощности шума в звуковом или видеоканале или увеличение коэффициента ошибок). Коэффициент W в общем случае зависит от характеристик как полезного, так и мешающего сигналов.

При помехах между системами передачи телефонии ЧРК-ЧМ коэффициент W может быть вычислен по формуле:

$$W = 10 \log [f_m(1 + rm) D(f_m, 0)] \quad \text{дБ}, \quad (5c)$$

где

m : среднеквадратичный индекс модуляции в системе, подверженной помехе;

r : отношение пикового напряжения многоканального сигнала к среднеквадратичному (эффективному) напряжению в системе, подверженной помехе.

Заметим, что член $f_m(1 + rm)$ представляет половину ширины полосы частот сигнала, подверженного помехе, по правилу Карсона.

Член $D(f_m, 0)$ — это величина свертки, содержащаяся в коэффициенте уменьшения помехи B , указанном в формуле (3) Отчета 388.

Если среднеквадратичный индекс модуляции полезного сигнала превышает примерную величину 0,8, то W будет не более примерной величины в 4 дБ при условии, что в качестве эталонной ширины полосы частот выбрана «шумовая» ширина полосы частот полезного сигнала.

Для очень малых среднеквадратичных индексов модуляции полезного сигнала W может принимать широкий диапазон значений, увеличиваясь с уменьшением индекса модуляции как полезного, так и мешающего сигналов. В этих случаях оказалось полезным выбирать в качестве эталонной ширины полосы частот номинальную ширину полосы частот телефонного канала 4 кГц, при этом $W \leq 0$ дБ.

При полезном сигнале в цифровой форме W обычно бывает равно или менее 0 дБ, независимо от характеристик мешающего сигнала.

В Отчете 388 приводятся данные, с помощью которых можно вычислить коэффициент W более точно.

2.3.2 Помеха от земной станции: коэффициент чувствительности

Используя формулу (2), можно выделить член $G_r - P_r(p)$ и определить коэффициент чувствительности к помехам S (дБВт) наземных станций, подверженных помехам:

$$S = G_r - P_r(p) \quad \text{дБВт}$$

В таблице I представлены величины этого коэффициента для различных типов наземных станций.

Координационный контур связан с (максимальным) коэффициентом чувствительности S и может быть отмечен его величиной. В дополнение к этому, однако, полезно начертить ряд вспомогательных контуров, для которых коэффициент чувствительности S на 5, 10, 15, 20 дБ и т. д. менее коэффициента, соответствующего координационному контуру. Эти вспомогательные контуры можно использовать для исключения из дальнейшего рассмотрения некоторых существующих или планируемых станций, размещенных в пределах координационной зоны, не прибегая к более точным вычислениям.

2.3.3 Помеха земной станции со стороны наземной станции: эквивалентная изотропно излучаемая мощность

Используя формулу (2), аналогично можно выделить член $P_r' + G_r'$ и определить эквивалентную изотропно излучаемую мощность E' (в дБВт) мешающей наземной станции:

$$E' = P_r' + G_r' \quad \text{дБВт},$$

величины которой приведены в таблице II.

В дополнение к координационному контуру, определенному и отмеченному максимальной величиной E' , полезно начертить вспомогательные контуры, для которых величины E' на 5, 10, 15, 20 дБ и т.д. менее величины, соответствующей координационному контуру. Эти вспомогательные контуры облегчают исключение некоторых наземных станций из дальнейшего рассмотрения.

2.3.4 Примеры

- Определить минимальные допустимые потери передачи и минимальные допустимые основные потери передачи в случае помехи от земной станции, работающей с геостационарным спутником, наземной станции, работающей на частоте 6 ГГц, при использовании обеими станциями угловой модуляции.

$$\begin{aligned} \text{По таблице I: } P_r(0,005\%) &= -131 \text{ дБВт,} \\ S &= 176 \text{ дБВт,} \end{aligned}$$

так что, согласно формуле (1)

$$L(p) = L(0,005\%) = P_r + 131 \quad \text{дБ,}$$

и по формуле (2)

$$\begin{aligned} L_b(p) = L_b(0,005\%) &= P_r + G_r + G_s - P_r(0,005\%) && \text{дБ,} \\ &= P_r + G_r + S && \text{дБ,} \\ &= P_r + G_r + 176 && \text{дБ} \end{aligned}$$

- Определить минимальные допустимые потери передачи и минимальные допустимые основные потери передачи в случае помехи земной станции, работающей с геостационарным спутником, от наземной станции, работающей на частоте 4 ГГц, при использовании обеими станциями угловой модуляции.

$$\begin{aligned} \text{По таблице II: } P_r(0,01\%) &= 10 \log T_e - 164 && \text{дБ,} \\ E' &= 55 \text{ дБВт,} \end{aligned}$$

$$G_r (\text{предположительно}) = 42 \text{ дБ, следовательно, } P_r = 13 \text{ дБВт,}$$

так что, согласно формуле (1)

$$\begin{aligned} L(p) = L(0,01\%) &= 13 - 10 \log T_e + 164 && \text{дБ,} \\ &= 177 - 10 \log T_e && \text{дБ} \end{aligned}$$

и по формуле (2)

$$\begin{aligned} L_b(p) = L_b(0,01\%) &= P_r + G_r + G_s - P_r(0,01\%) && \text{дБ,} \\ &= E' + G_r - 10 \log T_e + 164 && \text{дБ,} \\ &= G_r - 10 \log T_e + 219 && \text{дБ.} \end{aligned}$$

если исходить из предположения, что мощность помехи в телефонном канале может составлять 1000 пВтпсф, где мощность тепловых шумов 7000 пВтпсф ($J = -8,5$ дБ, см. примечание 2, выше), а ширина полосы радиочастот 1 МГц.

2.3.5 Дополнительные формы вспомогательных контуров

Вспомогательные контуры, описанные в пунктах 2.3.2 и 2.3.3, могут также обозначаться путем указания избегаемых углов, как это отмечается в приложении I к Отчету 448.

2.3.6 Координационные параметры для земных станций, осуществляющих прием очень узкополосных передач

2.3.6.1 Общие соображения

В отношении земной станции, осуществляющей прием как широкополосных, так и очень узкополосных передач (например, ОКН, один канал на несущей), может оказаться желательным определение двух отдельных координационных контуров: один — для узкополосных передач и другой — для широкополосных передач с указанием конкретных полос частот, используемых для очень узкополосных передач. Потребность в осуществлении координации в отношении узкополосных передач может привести к получению больших координационных расстояний. Нужно продолжить исследования в целях установления подходящих величин параметров J , p , $M(p)$, W и т.д. Одна из администраций уже предложила метод расчета таких параметров [МККР, 1978-82а].

2.3.6.2 Узкополосные передачи с предварительно выделенными каналами

При таких передачах следует заменить величину эталонной ширины полосы частот на величину ширины полосы радиочастот, занимаемой одной такой узкополосной передачей.

2.3.6.3 Узкополосные передачи с предоставлением каналов по требованию

В отношении таких передач, кроме вышесказанного, целесообразно учитывать уменьшенную вероятность того, что конкретный частотный канал будет подвержен помехе в тот момент, когда он в действительности выбран («затребован») для использования какой-либо земной станцией.

3. Определение координационного расстояния для распространения по моде (1) — механизм распространения по дуге большого круга *

3.1 Радиоклиматические зоны

Для целей расчета координационного расстояния при распространении по моде (1) земная поверхность поделена на четыре основные радиоклиматические зоны. Эти зоны определены следующим образом:

- Зона A1: прибрежные зоны и побережье, то есть суша, прилегающая к Зоне В или Зоне С (см. ниже), вплоть до уровня 100 м ** выше среднего уровня моря или уровня воды, но ограниченная максимальным расстоянием в 50 км от ближайшей Зоны В или Зоны С, в зависимости от конкретного случая;
- Зона A2: все сухопутные территории, кроме прибрежных зон и побережья, определенных как Зона A1;
- Зона В: «холодные» моря, океаны и другие большие водные пространства (то есть имеющие размеры по крайней мере 100 км в диаметре), расположенные выше 30° широты, за исключением Средиземного и Черного морей;
- Зона С: «теплые» моря, океаны и другие большие водные пространства (то есть имеющие размеры по крайней мере 100 км в диаметре), расположенные ниже 30° широты, а также Средиземное и Черное моря.

3.2 Расчет координационного расстояния для трасс, проходящих в одной климатической зоне

Координационное расстояние для распространения по моде (1) определяется путем сравнения минимальных допустимых основных потерь передачи (см. пункт 2.2) между земной станцией и гипотетической наземной станцией с прогнозируемыми основными потерями передачи, зависящими от расстояния. Расстояние, для которого величины минимальных допустимых и прогнозируемых основных потерь передачи совпадают, и есть координационное расстояние.

Последующие сведения представлены в двух формах. В пункте 3.2.1 даны основные формулы, с помощью которых можно вычислить координационное расстояние. В пункте 3.2.2 представлен графический метод определения координационного расстояния.

3.2.1 Численный метод

Прогнозируемые основные потери передачи определяются по формуле:

$$L_b(p_x) = 120 + 20 \log f + d(0,01 + \beta_0 + \beta_v + \beta_z) + A_h \quad \text{дБ}, \quad (6)$$

где

f : рассматриваемая частота (ГГц);

p_x : процент времени (%);

β_0 : коэффициент поглощения в кислороде (дБ/км);

β_v : коэффициент поглощения в водяных парах (дБ/км).

Член β_z — коэффициент затухания на трассе, зависящий от радиоклиматической зоны, частоты и процента времени:

$$\text{— для Зоны A1: } \beta_{zA1} = [0,109 + 0,100 \log(f - 0,1)] p_x^{0,16} \quad \text{дБ/км}, \quad (7a)$$

$$\text{— для Зоны A2: } \beta_{zA2} = [0,146 + 0,148 \log(f - 0,15)] p_x^{0,12} \quad \text{дБ/км}, \quad (7b)$$

$$\text{— для Зоны В: } \beta_{zB} = [0,05 + 0,096 \log(f + 0,25)] p_x^{0,19} \quad \text{дБ/км}, \quad (7c)$$

$$\text{— для Зоны С: } \beta_{zC} = [0,04 + 0,078 \log(f + 0,25)] p_x^{0,16} \quad \text{дБ/км}. \quad (7d)$$

* Альтернативный метод, подлежащий дальнейшему изучению, описан в приложении I.

** При отсутствии точной информации относительно контура по уровню 100 м может быть использована приближенная величина (например, 300 футов, или 91,2 м). Если нет подходящих данных для контура, то следует применять предельное расстояние в 50 км от береговой линии.

Коэффициент поглощения в кислороде зависит от частоты:

$$\beta_0 = \left[0,00719 + \frac{6,09}{f^2 + 0,227} + \frac{4,81}{(f - 57)^2 + 1,50} \right] f^2 / 10^3 \quad \text{дБ/км.} \quad (8)$$

Коэффициент поглощения в водяных парах зависит как от частоты, так и от плотности водяных паров ρ :

$$\beta_v = \left[6,73 + \frac{300}{(f - 22,3)^2 + 7,3} \right] \rho f^2 / 10^6 \quad \text{дБ/км,} \quad (9)$$

где ρ — плотность водяных паров (г/м^3) и зависит от радиоклиматической зоны. Следует использовать следующие величины ρ :

- для Зоны А1: $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$;
- для Зоны А2: $\rho = 5 \text{ г/м}^3$;
- для Зоны В : $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$;
- для Зоны С : $\rho = 10 \text{ г/м}^3$.

Член A_h в формуле (6) является поправочным коэффициентом, учитывающим угол места горизонта земной станции θ^* . Он может быть вычислен следующим образом:

$$A_h = 20 \log [1 + 4,5 \theta f^{0,5}] + \theta f^{0,33} \quad \text{дБ при } \theta \geq 0^\circ \quad (10a)$$

$$= 0 \text{ дБ} \quad \text{при } \theta < 0^\circ \quad (10b)$$

Максимальное значение A_h равно 30 дБ; использование больших величин может не обеспечить достаточной защиты.

Минимальные допустимые основные потери передачи даются в виде интегрального распределения во времени, определяемого для $p < p_x < 20\%$ следующим образом:

$$L_m(p_x) = P_{f'} + G_e + 42 + \Delta G - P_r(p) + \\ + M(p) \left[1 - \frac{(9 - 5 \log p_x)^{0,5} - 1,58}{(9 - 5 \log p)^{0,5} - 1,58} \right] \quad \text{дБ,} \quad (11)$$

где

G_e : усиление антенны земной станции в направлении на горизонт (дБи);

ΔG : разность (в дБ) между предполагаемым максимальным усилением антенны наземной станции и величиной 42 дБ. В таблицах I и II, соответственно, приведены величины ΔG для различных полос частот.

Все прочие параметры, указанные в формуле (11), были определены ранее. Следует отметить, что процент времени p_x является независимой переменной; процент времени p связан с критерием кратковременной помехи.

Для определения координационного расстояния следует приравнять правые части формул (6) и (11) и рассчитать расстояние d для всех процентов времени от p до 20%. Наибольшее из полученных таким образом расстояний является координационным расстоянием d_1 в рассматриваемом азимутальном направлении.

* Угол горизонта θ определяется здесь как угол, наблюдаемый из центра антенны земной станции между горизонтальной плоскостью и лучом, направленным на видимый физический горизонт в заданном направлении.

В большинстве реальных случаев d_1 соответствует $p_x = p$. Для подтверждения этого полезно определить сначала d только для $p_x = p$ и $p_x = 10p$. Если $d(p_x = p) > d(p_x = 10p)$, то $d(p_x = p)$ соответствует d_1 , то есть представляет интерес только процент кратковременного критерия. В этом случае нет необходимости определять d для всех процентов p_x . Заметим, что при $p_x = p$ величина в квадратных скобках в формуле (11) равна нулю.

Вышеуказанные расчеты приводят к получению d_1 при условии, что вся предполагаемая трасса помехи проходит в одной радиоклиматической зоне. В отношении расчета d_1 на трассах со смешанными зонами см. пункт 3.3.

3.2.2 Графический метод

Для пользователей может оказаться удобным применить графический метод определения d_1 . Однако формула (6), являющаяся основой графического метода, имеет пять переменных: $L_b(p_x)$, p_x , f , θ и d , каждая из которых меняется в широких пределах. Имеется и шестая переменная: радиоклиматическая зона, в отношении которой нет затруднений. Удобнее всего исключить из переменных угол горизонта θ земной станции и сделать его объектом отдельного этапа расчетов при определении d_1 .

Тогда формулу (6) можно переписать, включив в нее то, что называют основными координационными потерями — $L_1(p_x)$:

$$L_1(p_x) = L_b(p_x) - A_h = 120 + 20 \log f + d(0,01 + \beta_0 + \beta_v + \beta_z) \quad \text{дБ.} \quad (12)$$

На рис. 2—11 изображена зависимость между $L_1(p_x)$, p_x и d_1 для четырех радиоклиматических зон, причем каждый рисунок относится к одной частоте. На каждом рисунке даны четыре оси абсцисс, представляющих четыре радиоклиматические зоны.

На рис. 1 приведена зависимость поправочного коэффициента A_h от угла горизонта θ и частоты.

Для определения координационного расстояния необходимо сделать следующее:

- Отложить основные координационные потери, получаемые как разность

$$L_1(p_x) = L_m(p_x) - A_h \quad \text{дБ,} \quad (13)$$

используя формулы (10) и (11) *, для всех процентов времени от p до 1% на соответствующем рисунке из рис. 2—11 при соответствующей шкале оси абсцисс. Получим кривую, начинающуюся выше величины p (процент времени, связанный с критерием кратковременной помехи) и опускающуюся вниз вправо.

- Найти среди имеющихся на рисунке кривых такую кривую, которая полностью лежит ниже построенного сегмента кривой, но касается ее в одной точке. Расстояние, которым помечена эта кривая, и есть координационное расстояние d_1 . Если ни одна из имеющихся на рисунке кривых не касается построенного сегмента кривой, следует с помощью интерполяции оценить расстояние, соответствующее какой-либо кривой, которая будет касаться построенного сегмента кривой в одной точке, но будет полностью лежать ниже ее. Это расстояние и будет координационным расстоянием d_1 .

Примечание.— Обычно находят, что точка, в которой касаются обе кривые, является точкой, соответствующей малому проценту времени p . Для того чтобы убедиться, что это так, нет необходимости в построении всего семейства распределения $L_1(p_x)$, можно обойтись лишь двумя точками для p и $10p$. Если расстояние d для точки, соответствующей p , оказывается больше, чем расстояние, найденное для точки, соответствующей $10p$, то расстояние, соответствующее p , будет координационным расстоянием d_1 и нет необходимости исследовать другие величины p_x .

3.3 Смешанные трассы

Если расстояние, которое должно получиться при расчете, захватывает более чем одну радиоклиматическую зону (смешанная трасса), то расчеты надо вести следующим образом.

Обозначив последовательные участки трассы в различных зонах индексами $i, j, k, \dots$, получаем

$$L_b(p) - A_0 - A_h = \beta_i d_i \quad \text{дБ,} \quad (14)$$

где β_i — скорость затухания в первой зоне.

* Или из рис. 1 в случае A_h .

Далее, следуя в рассматриваемом направлении, если величина d_i больше, чем действительно имеющееся расстояние D_i в первой зоне, найдем

$$L_b(p) - A_0 - A_h - \beta_i D_i = \beta_j d_j \quad \text{дБ} \quad (15)$$

и таким образом получим d_j . Если величина d_j больше, чем расстояние D_j трассы во второй зоне, можно утверждать, что

$$L_b(p) - A_0 - A_h - \beta_i D_i - \beta_j D_j = \beta_k d_k \quad \text{дБ}, \quad (16)$$

откуда может быть найдено d_k . Этот метод при необходимости может быть продолжен, и в данном случае суммарное расстояние d_1 может быть выражено формулой:

$$d_1 = D_i + D_j + d_k \quad \text{км.} \quad (17)$$

В приложении II даются примеры графического применения этой процедуры.

3.4 Максимальное координационное расстояние для распространения по моде (1)

Максимальное координационное расстояние для распространения по моде (1) должно составлять 1200 км.

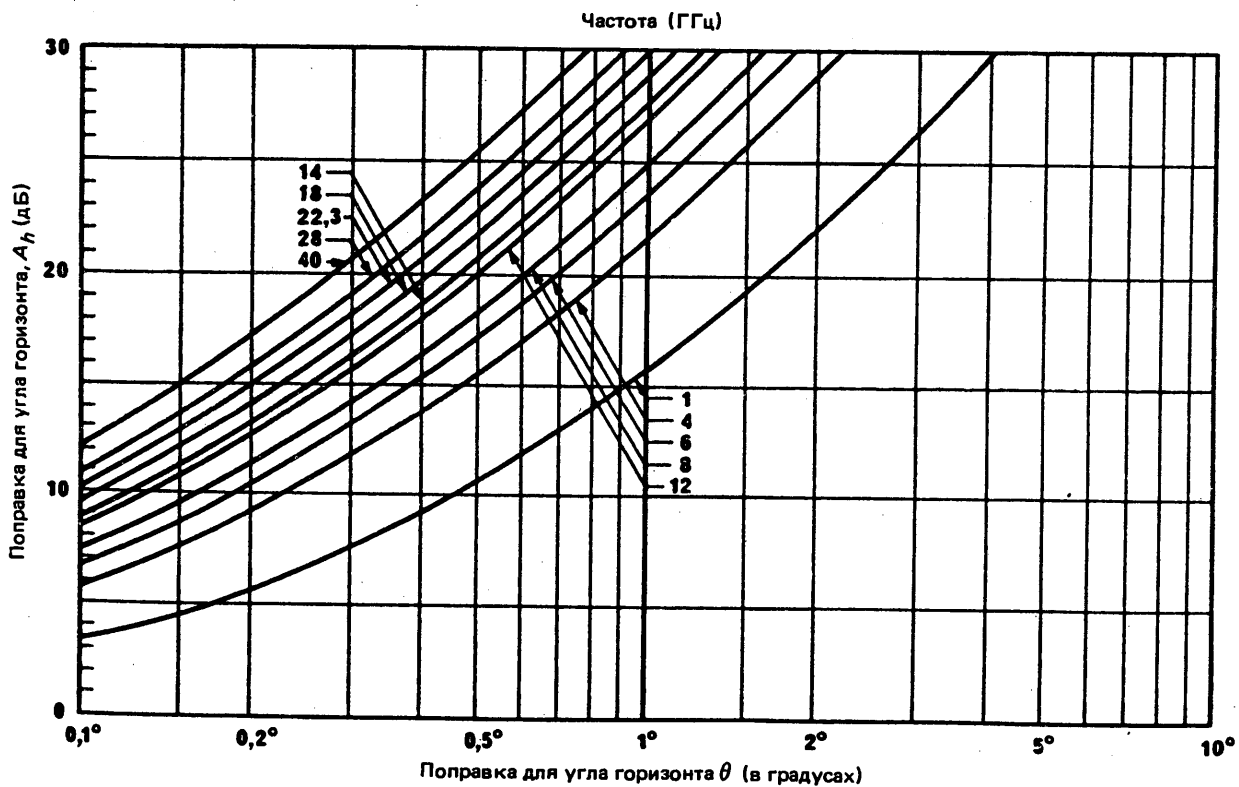


РИСУНОК 1 — Поправка для угла горизонта A_h в зависимости от угла горизонта и частоты

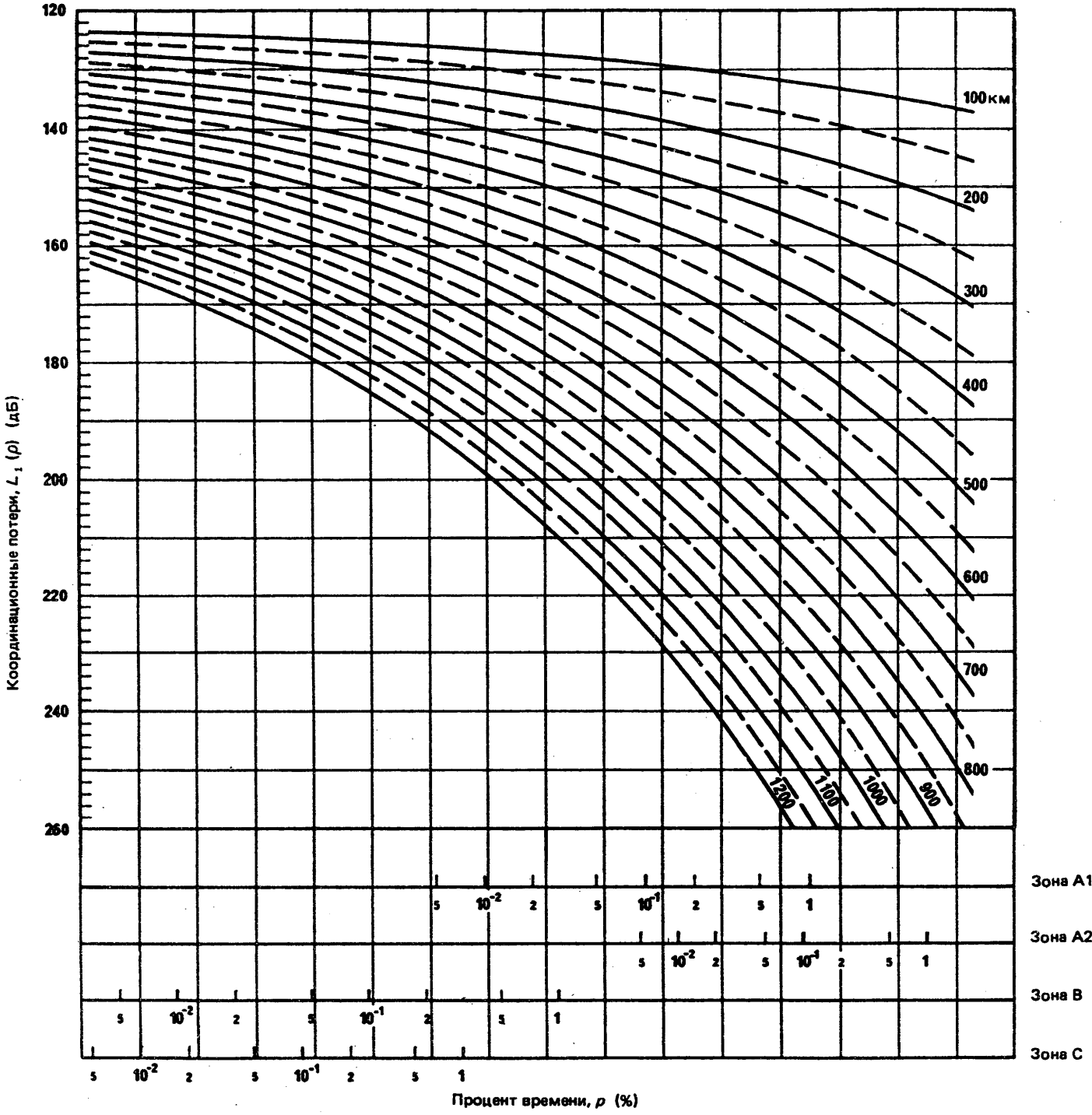


РИСУНОК 2 — Координационные потери в зависимости от процента времени, р, для различных расстояний; $f = 1$ ГГц

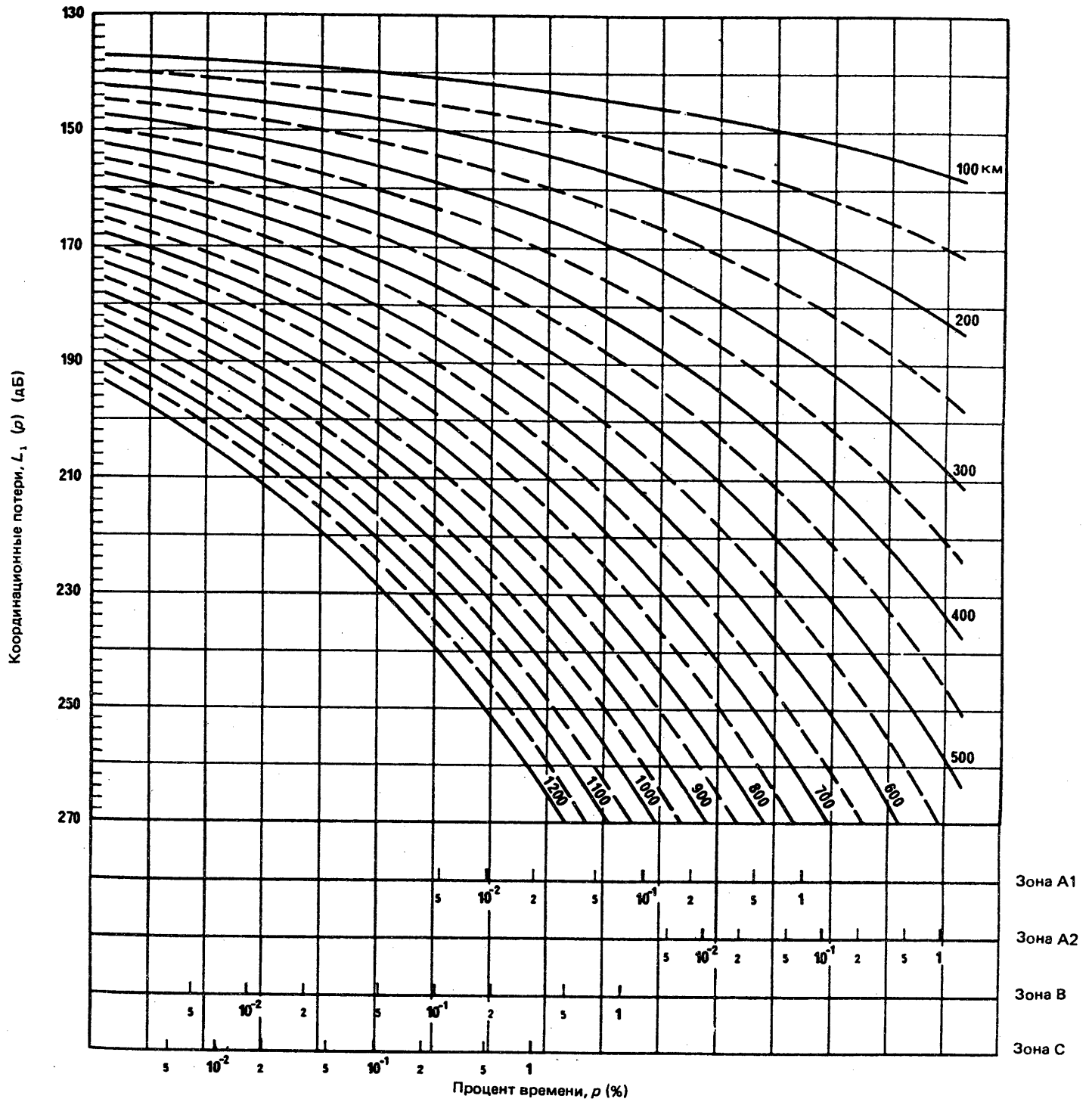


РИСУНОК 3 — Координационные потери в зависимости от процента времени, p , для различных расстояний; $f = 4$ ГГц

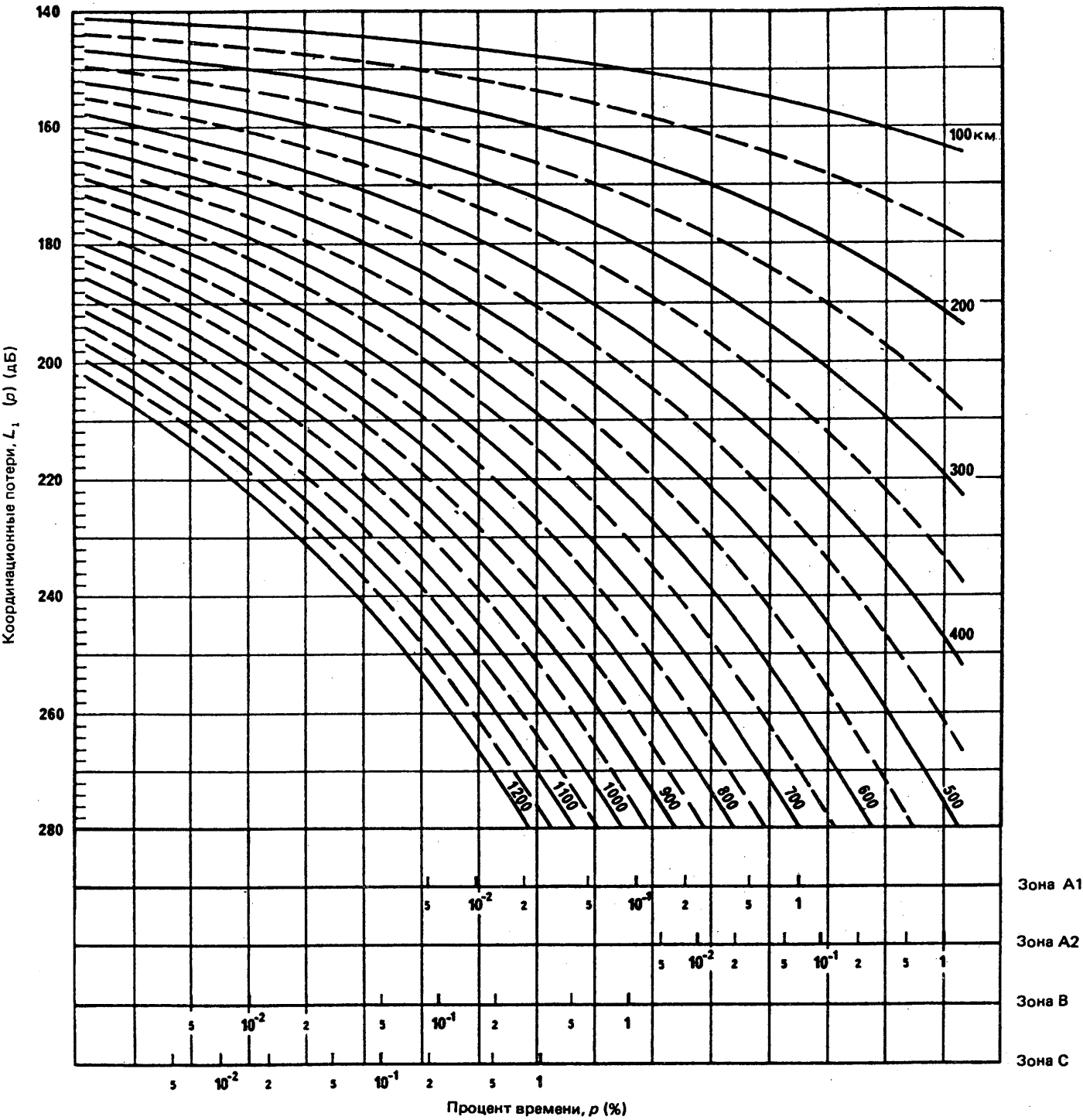


РИСУНОК 4 — Координационные потери в зависимости от процента времени, р, для различных расстояний; $f=6$ ГГц

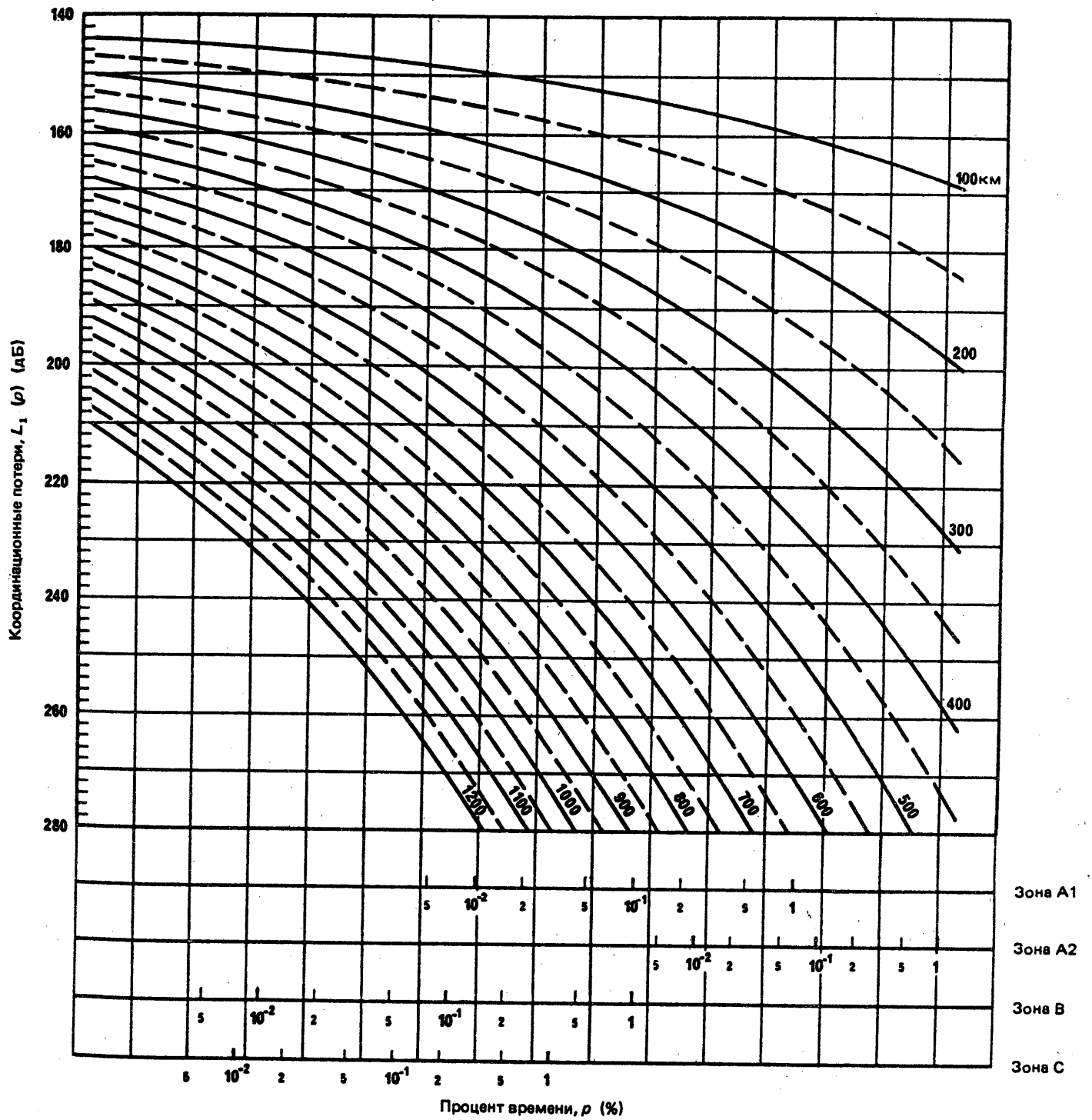


РИСУНОК 5 — Координационные потери в зависимости от процента времени, p , для различных расстояний; $f=8$ ГГц

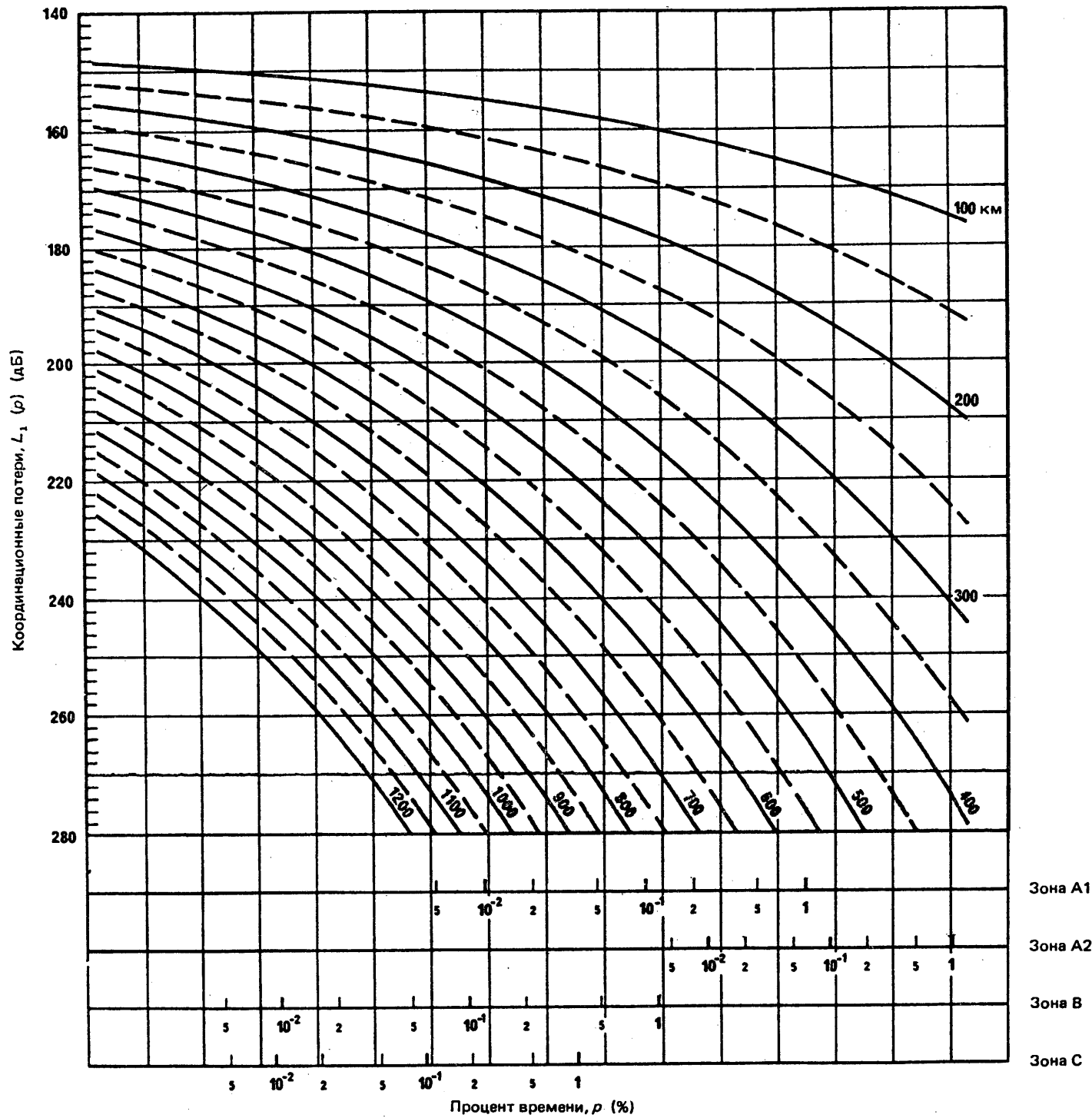


РИСУНОК 6 — Координационные потери в зависимости от процента времени, p , для различных расстояний; $f = 12$ ГГц

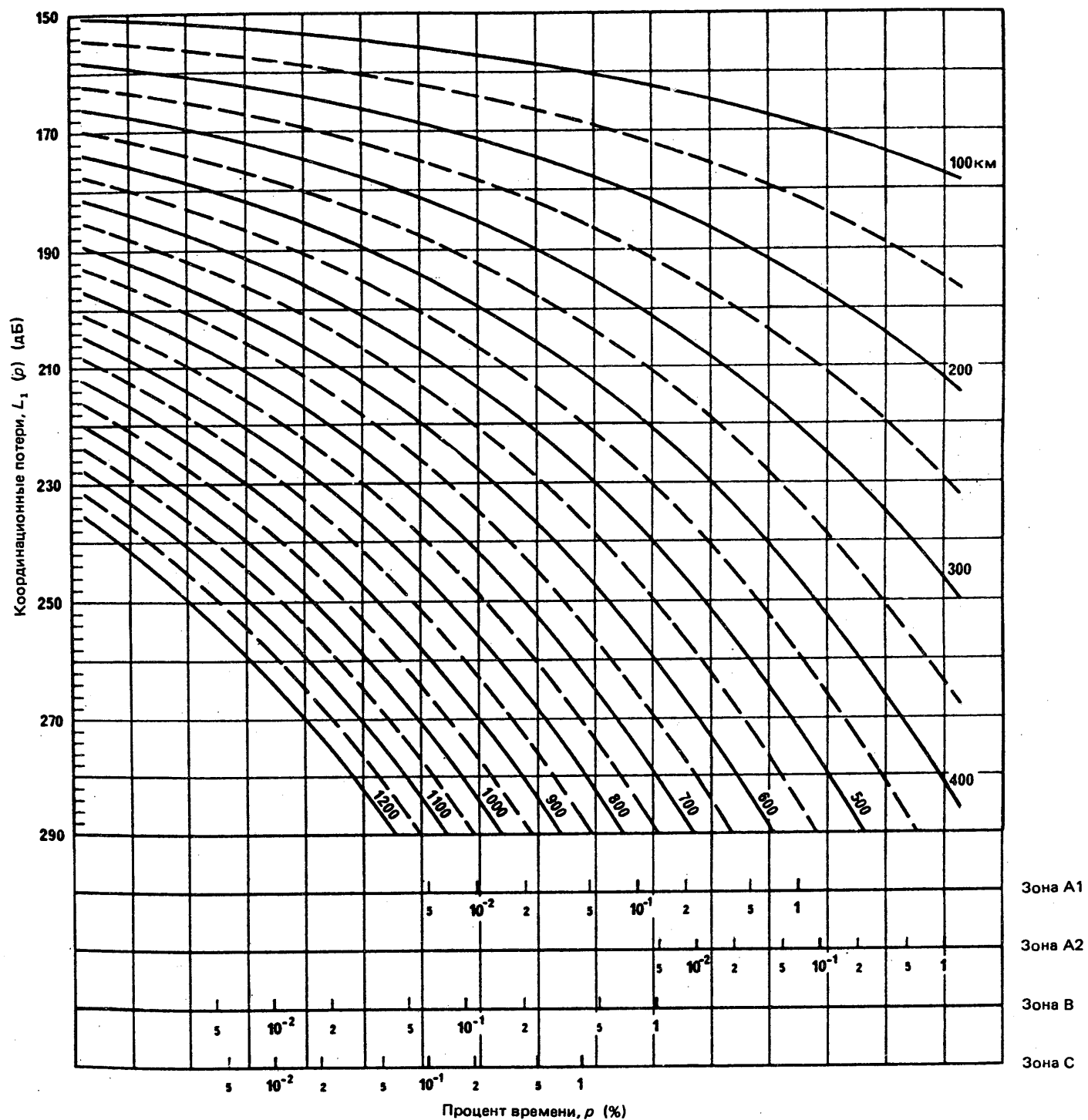


РИСУНОК 7 — Координационные потери в зависимости от процента времени, p , для различных расстояний; $f = 14$ ГГц

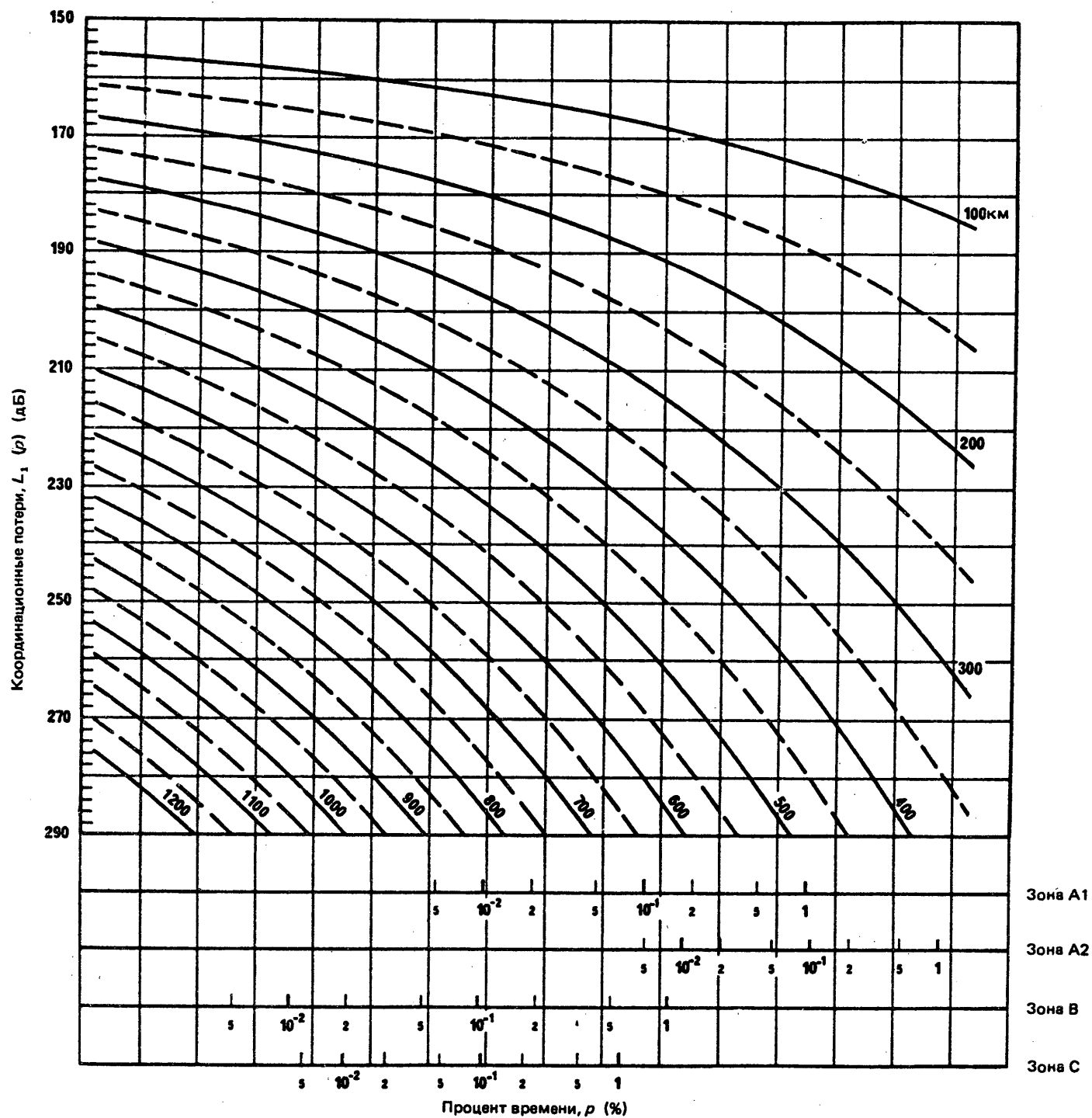


РИСУНОК 8 — Координационные потери в зависимости от процента времени, p, для различных расстояний; $f = 18$ ГГц

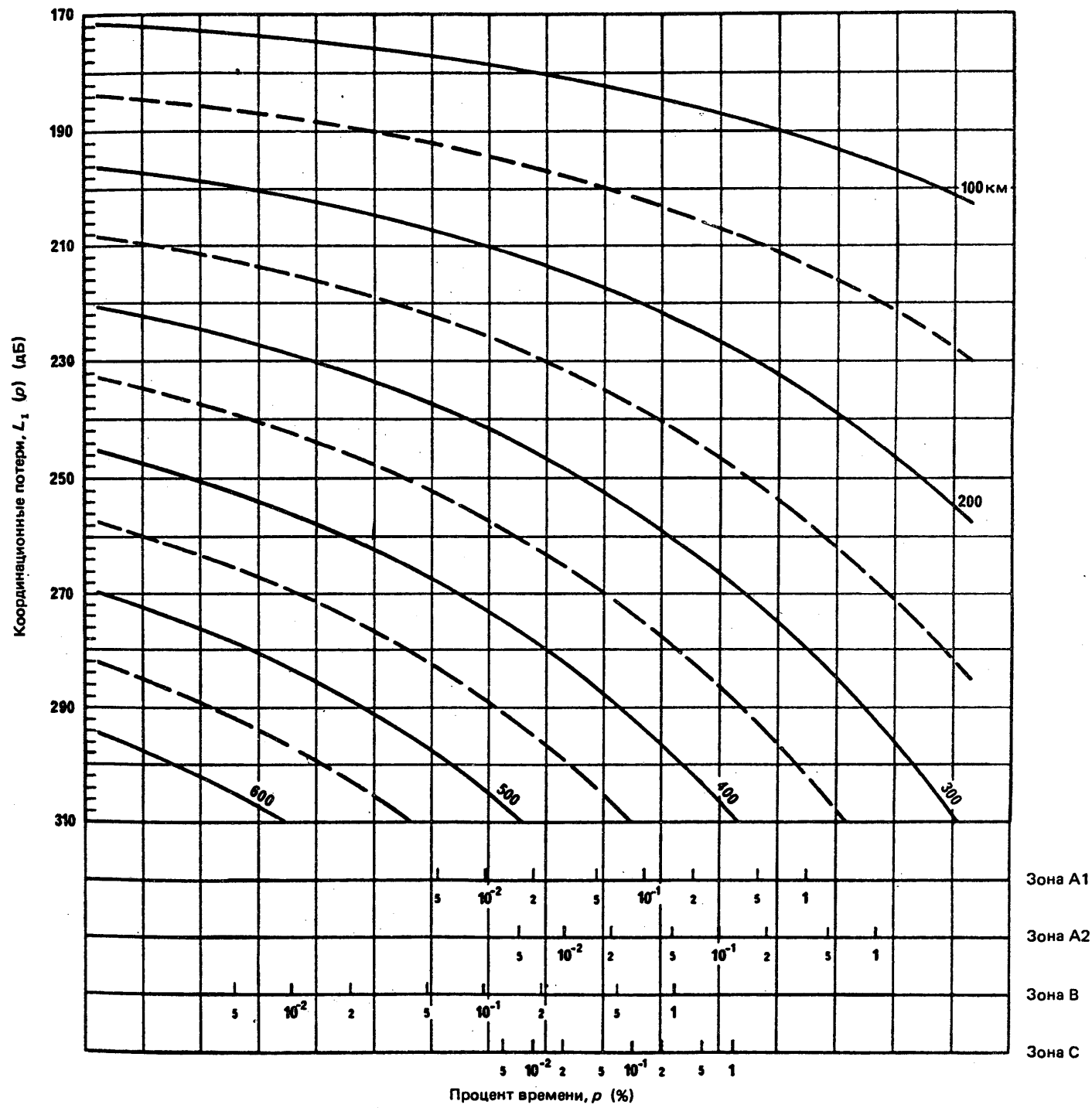


РИСУНОК 9 — Координационные потери в зависимости от процента времени, p , для различных расстояний; $f = 22,3$ ГГц

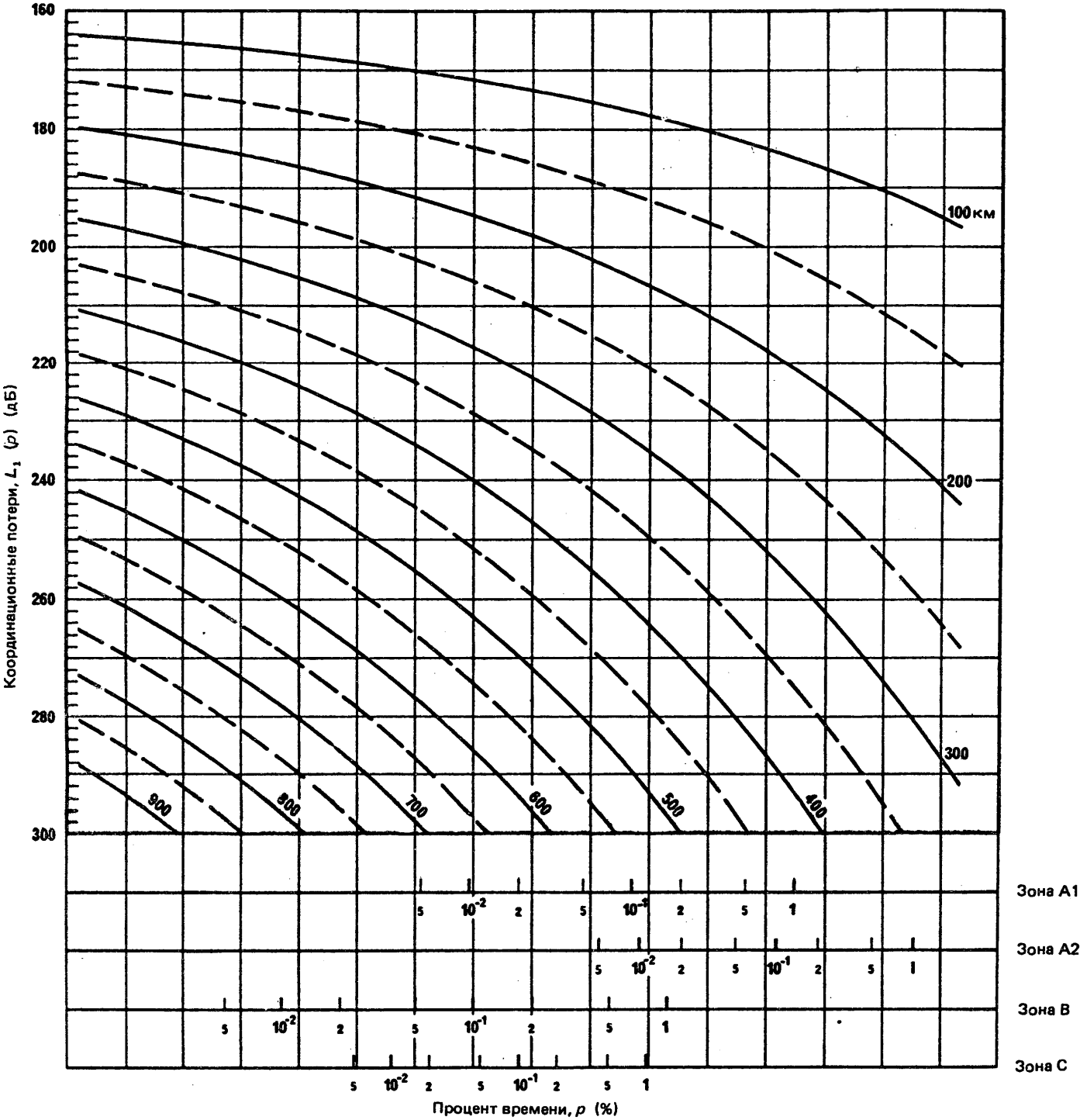


РИСУНОК 10 — Координационные потери в зависимости от процента времени, p , для различных расстояний; $f = 28$ ГГц

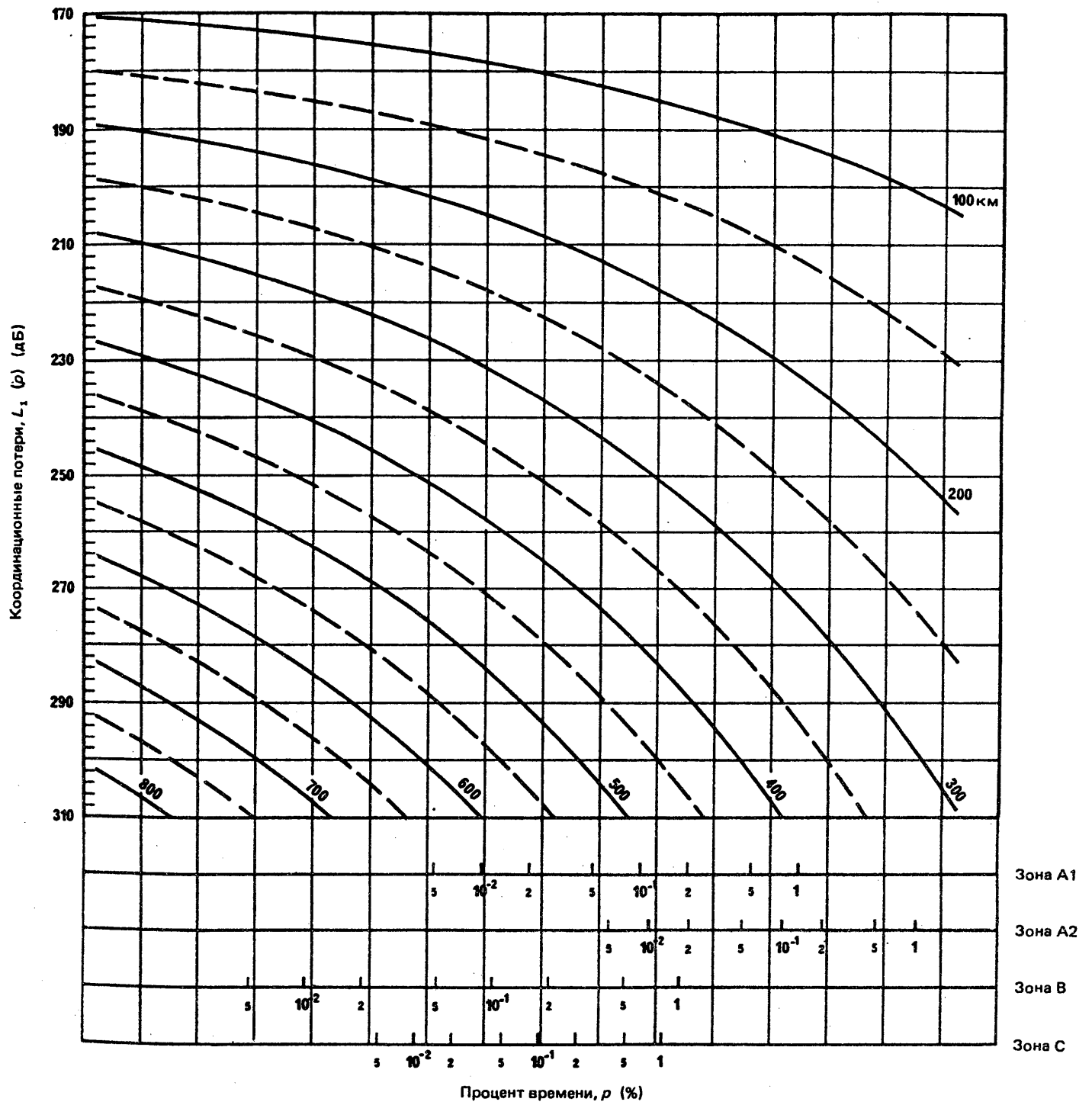


РИСУНОК 11 — Координационные потери в зависимости от процента времени, p , для различных расстояний; $f = 40$ ГГц

4. Определение координационного контура распространения радиоволн по моде (2) при рассеянии гидрометеорами

Определение координационного контура при рассеянии гидрометеорами (рассеяние в дожде) основывается на геометрии трассы, существенно отличающейся от геометрии механизма распространения по дуге большого круга. В качестве первого приближения можно принять, что энергия рассеивается дождем изотропно, так что помеха может иметь место для больших углов рассеяния и для лучей, пересекающихся в стороне от трассы большого круга.

4.1 Нормализованное распределение потерь передачи, $L_2(p_x)$

Для определения координационного контура, связанного с рассеянием гидрометеорами, необходимо определить «нормализованное распределение потерь передачи», которое представляет собой интегральное распределение минимальных необходимых потерь передачи $L_2(p_x)$ для величин p_x в пределах от p до 20%. Это распределение может быть вычислено по формуле:

$$L_2(p_x) = P_r + \Delta G - P_r(p) + M(p) \left[1 - \frac{(9 - 5 \log p_x)^{0.5} - 1.58}{(9 - 5 \log p)^{0.5} - 1.58} \right] \quad \text{дБ}, \quad (18)$$

где

$p < p_x < 20\%$ (см. пункт 2.3.1);

ΔG : разность (в дБ) между максимальным усилением антенн наземных станций в рассматриваемой полосе частоты и величиной 42 дБ. Эти величины представлены в таблице I для передающих земных станций и в таблице II для приемных земных станций.

Все остальные параметры определены в пункте 2. Для наземных станций величины P_r представлены в таблице II.

4.2 Методы оценки

4.2.1 Общие соображения

Для данного типа распространения произведенная ранее классификация земной поверхности по радио-климатическим зонам более не применима.

Последующие сведения представлены в двух формах. В пункте 4.2.2 даны основные формулы, определяющие соотношение между интенсивностью дождя, потерями передачи и расстоянием рассеяния в дожде. Эти формулы позволяют выразить потери передачи через интенсивность дождя для любого заданного расстояния при интегральном распределении во времени интенсивности дождя в различных «дождевых климатических зонах», приведенных в приложении III.

Однако с точки зрения пользователя может оказаться более удобным использование графического метода, при котором интегральное распределение интенсивности дождя для различных дождевых климатических зон, представленных в приложении III, объединено с соотношением между интенсивностью дождя, потерями передачи и расстоянием при интегральном распределении потерь передачи, с расстоянием в качестве параметра. Такое объединение отображено на семействах кривых, изображенных на рис. 12—21.

4.2.2 Численное определение потерь передачи

Потери передачи могут быть вычислены в зависимости от расстояния r (км) *, частоты f (ГГц) и интенсивности дождя у земной поверхности R (мм/ч) по формуле:

$$L = 168 + 20 \log r - 20 \log f - 13,2 \log R - g_r + \\ + 10 \log A_b - 10 \log C + \Gamma + \beta_0 d_0 + \beta_v d_v, \quad \text{дБ}, \quad (19)$$

где

R : интенсивность дождя у земной поверхности (мм/ч), согласно данным, приведенным в приложении III, для различных дождевых климатических зон;

g_r : усиление антенны наземной станции (дБ), принимаемое равным 42 дБ;

A_b : определяется следующим образом:

$$10 \log A_b = 0,005 (f - 10)^{1,7} R^{0,4} \quad \text{дБ} \quad \text{для } 10 \text{ ГГц} < f < 40 \text{ ГГц}, \\ = 0 \quad \text{дБ} \quad \text{для } f < 10 \text{ ГГц}; \quad (20)$$

* r — расстояние между областью максимального рассеяния и возможным местом расположения наземной станции.

С определяется как

$$C = \frac{2,17}{\gamma_R d_i} (1 - 10^{-\gamma_R d_i / 5}) \quad \text{для } f > 4 \text{ ГГц} \quad (21)$$

$$= 1 \quad \text{для } f \leq 4 \text{ ГГц};$$

γ_R определяется как

$$\gamma_R = kR^a \quad \text{дБ} \quad (22)$$

В таблице III* даны величины k и a для вертикальной поляризации (которые учитывают минимальное удельное затухание).

Далее:

$$d_i = 3,5 R^{-0,08} \quad \text{км}; \quad (23)$$

$$\Gamma = 631 kR^{a-0,5} \times 10^{-[(R+1)^{0,19}]} \quad \text{дБ}; \quad (24)$$

$$d_o = 0,7 r + 32 \text{ км} \quad \text{для } r < 340 \text{ км},$$

$$= 270 \text{ км} \quad \text{для } r \geq 340 \text{ км}; \quad (25)$$

$$d_v = 0,7 r + 32 \text{ км} \quad \text{для } r < 240 \text{ км},$$

$$= 200 \text{ км} \quad \text{для } r \geq 240 \text{ км}. \quad (26)$$

Удельное затухание в газах β_0 (для кислорода) и β_v (для водяных паров) могут быть получены по формулам (8) и (9), представленным выше. Удельное затухание в водяных парах β_v следует рассчитывать, исходя из предполагаемой концентрации паров $\rho = 5 \text{ г/м}^3$.

Формула (19) позволяет выразить потери передачи L в зависимости от интенсивности дождя R с расстоянием гидрометеорологического рассеяния r в качестве параметра. Используя это соотношение совместно с интегральным распределением интенсивности дождя R , указанным в приложении III для дождевых климатических зон от А до Р, можно получить интегральное распределение потерь передачи для каждого дождевого климата и для каждого расстояния рассеяния в дожде.

4.2.3. Графическое определение потерь передачи

Для облегчения использования данных по распространению радиоволн, приведенных в данном Отчете, были сделаны построения интегрального распределения потерь передачи для расстояний рассеяния в дожде от 100 до 400 км и для пяти составных дождевых климатов. Каждый из этих пяти дождевых климатов включает в себя несколько реальных дождевых климатов, описанных в приложении III. Полученные интегральные распределения представлены на рис. 12—21 для указанных полос частот.

4.2.4. Определение координационного контура при рассеянии гидрометеорами

Процедура определения координационного контура при рассеянии гидрометеорами заключается в следующем:

- (а) Определить потери передачи, используя графический метод (см. пункт 4.2.3) или численный метод (см. пункт 4.2.2).

При использовании графического метода начертить на соответствующем рисунке (то есть на рис. 12—21) для рассматриваемой частоты кривую зависимости $L_2(p_x)$ с помощью формулы (18), используя абсциссу со шкалой процентов, соответствующую дождевому климату, в котором расположена земная станция и который определен согласно приложению III.

Если на рис. 12—21 рассматриваемая частота не представлена, то координационный контур рассеяния гидрометеорами может быть получен путем линейной интерполяции от величин расстояний, рассчитанных для двух соседних частот.

При применении численного метода следует сначала рассчитать кривые интегрального распределения потерь передачи, с расстоянием в качестве параметра, для рассматриваемой частоты и дождевой климатической зоны. Затем их следует использовать так же, как кривые, показанные на рис. 12—21.

* Величины k и a для частот, отличных от тех, которые указаны в таблице III, могут быть получены путем интерполяции в логарифмическом масштабе для частот k и в линейном масштабе для a .

ТАБЛИЦА III — Величины k и α в зависимости от частоты

Частота (ГГц)	k	α
1	0,000 035 2	0,880
4	0,000 591	1,075
6	0,001 55	1,265
8	0,003 95	1,31
10	0,008 87	1,264
12	0,016 8	1,20
14	0,029	1,15
18	0,055	1,09
20	0,069 1	1,065
22,4	0,090	1,05
25	0,113	1,03
28	0,150	1,01
30	0,167	1,00
35	0,233	0,963
40	0,310	0,929

ТАБЛИЦА IV — Максимальные расстояния
при рассеянии гидрометеорами (км)

Широта (градусы)	Максимальные расстояния при рассеянии гидрометеорами (км)
0—30	350
30—40	360
40—50	340
50—60	310
> 60	280

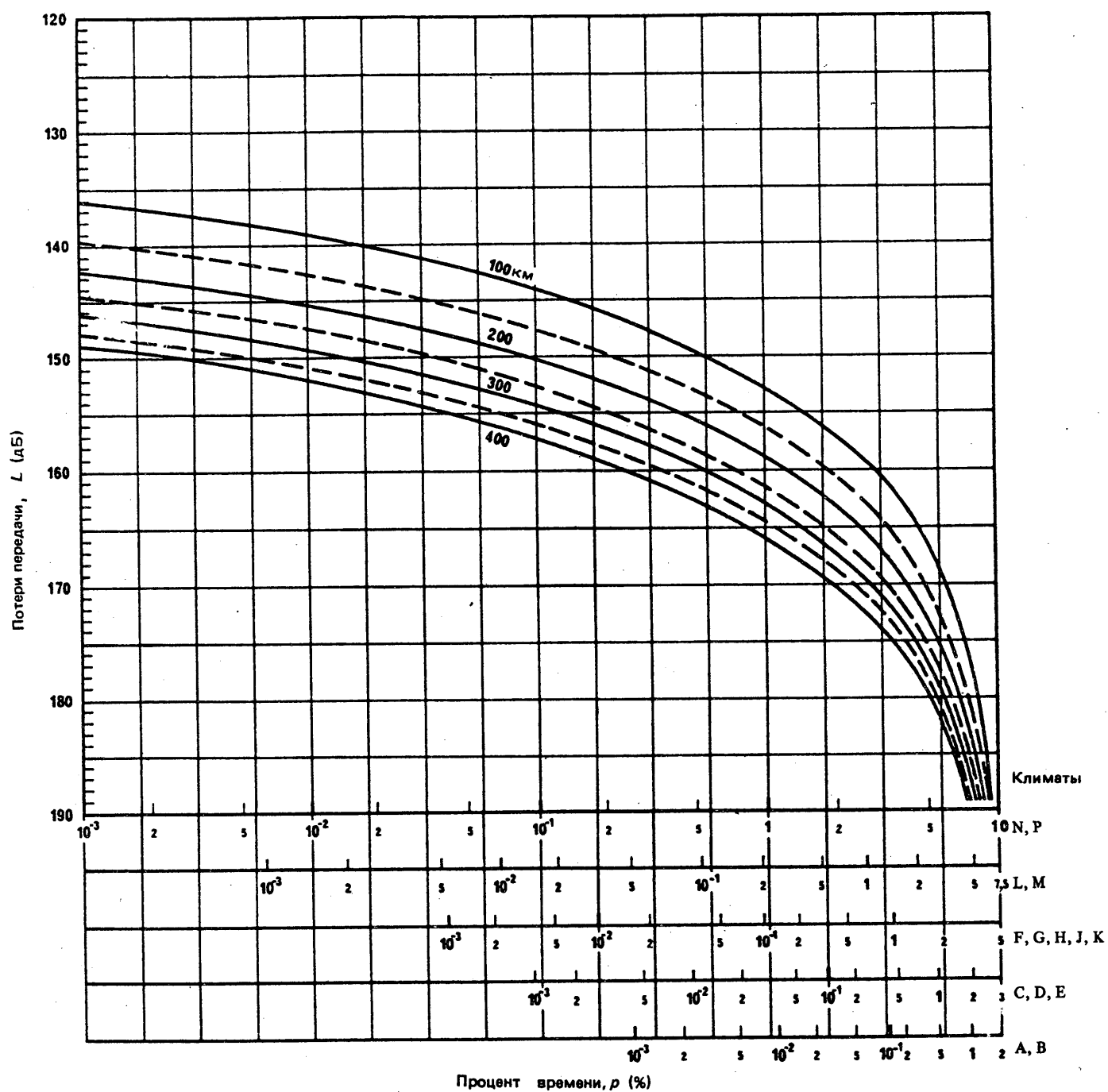


РИСУНОК 12 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f = 1$ ГГц

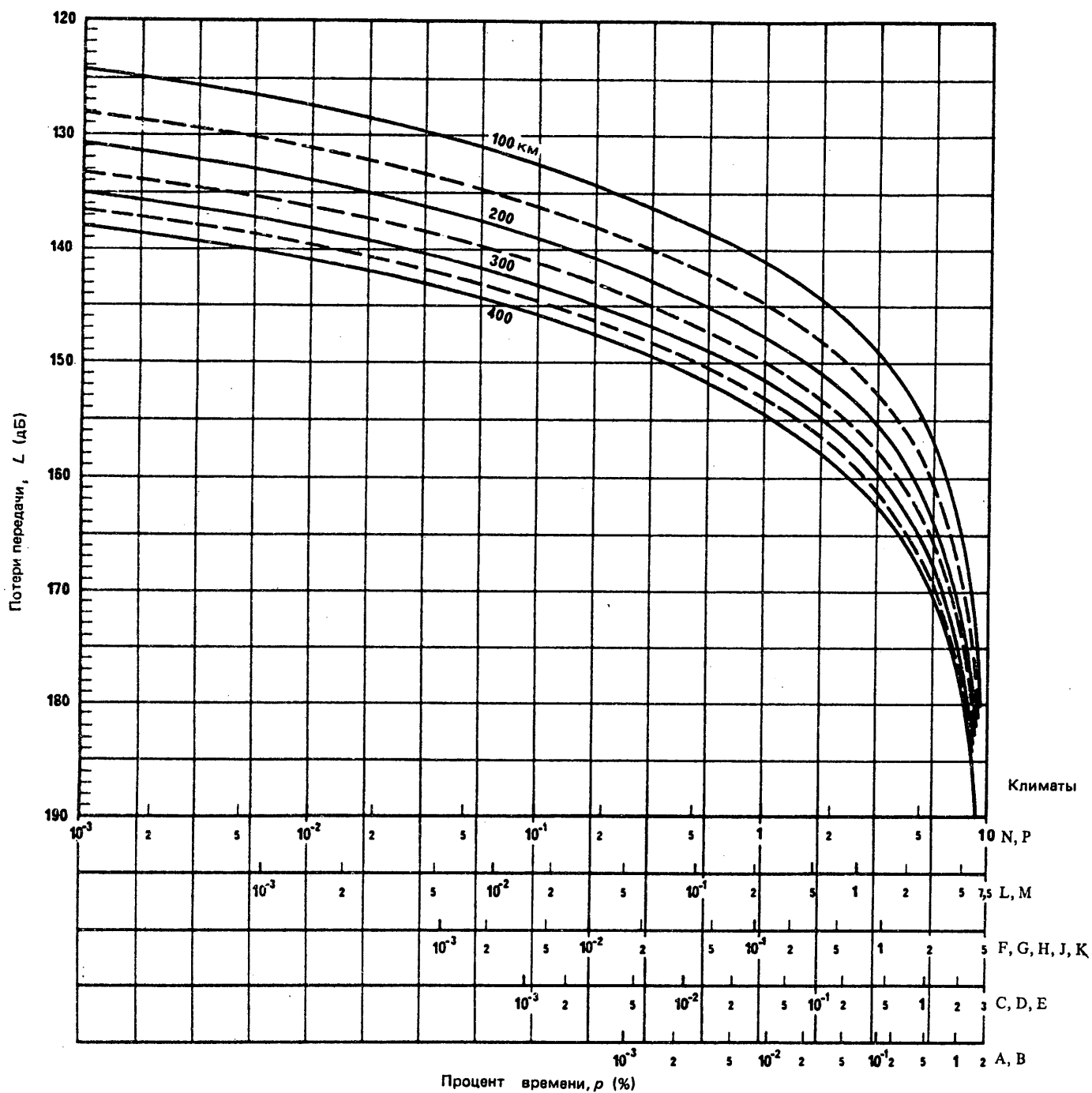


РИСУНОК 13 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f = 4$ ГГц

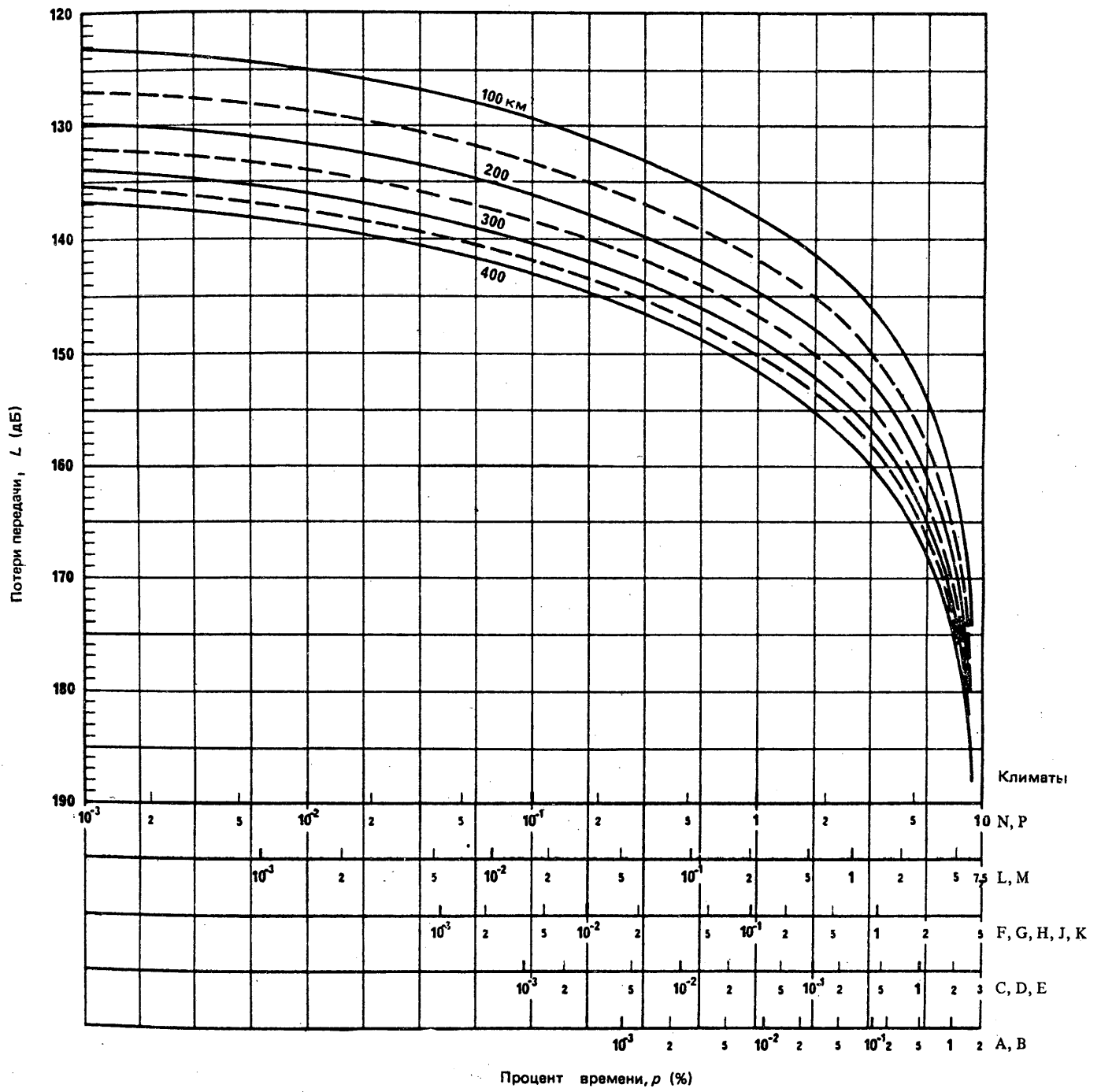


РИСУНОК 14 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f=6$ ГГц

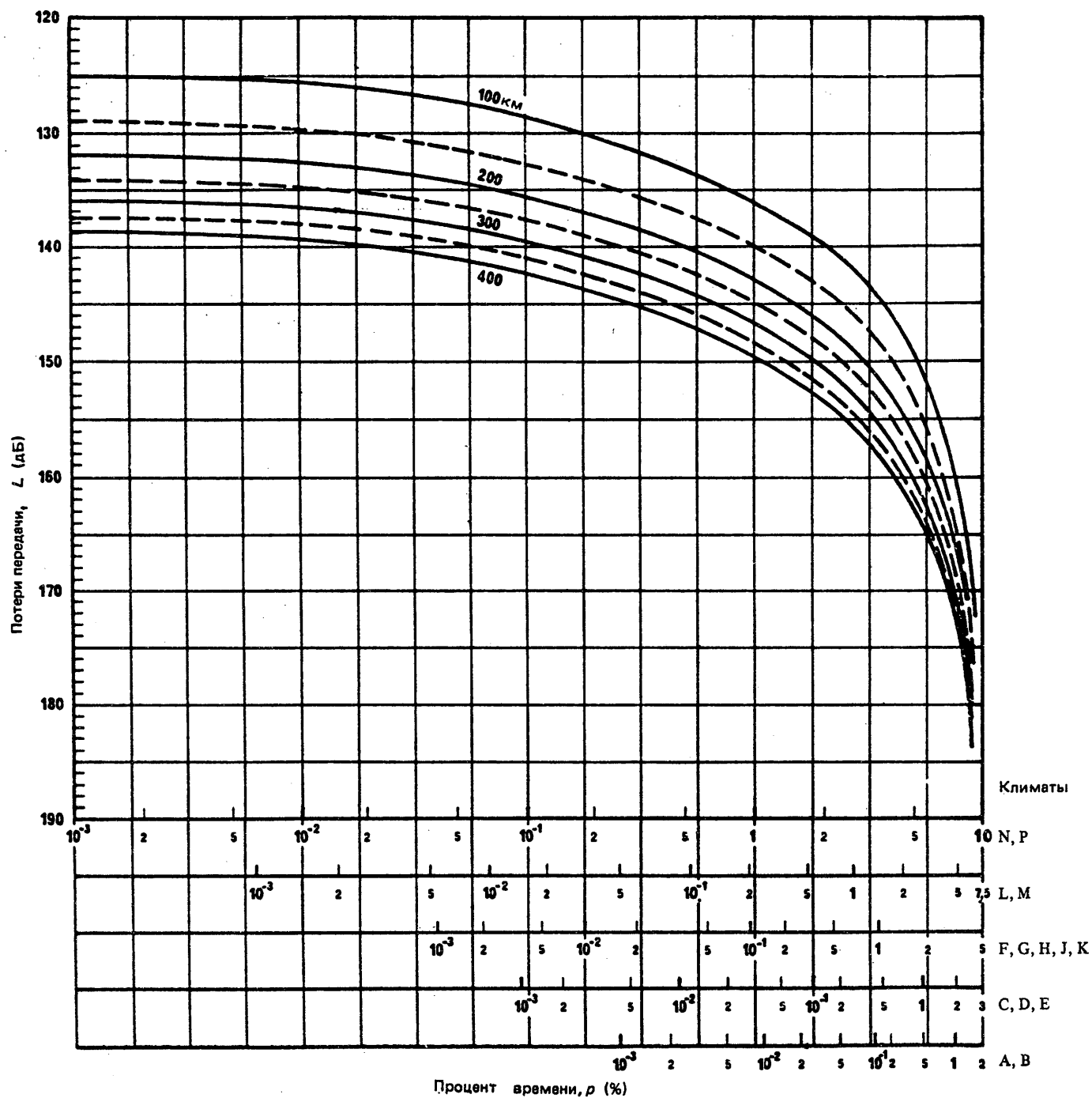


РИСУНОК 15 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f=8$ ГГц

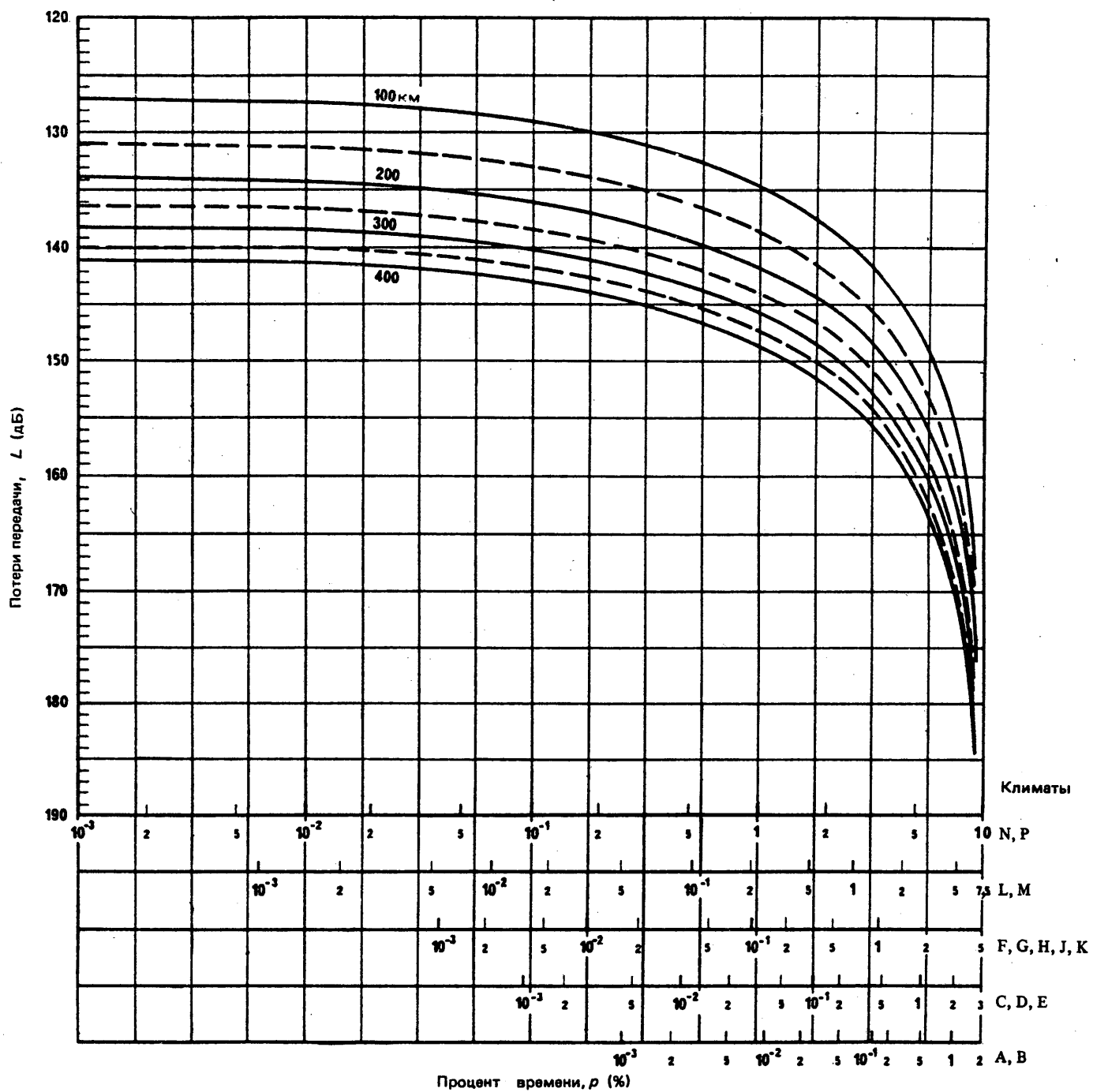


РИСУНОК 16 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f = 12$ ГГц

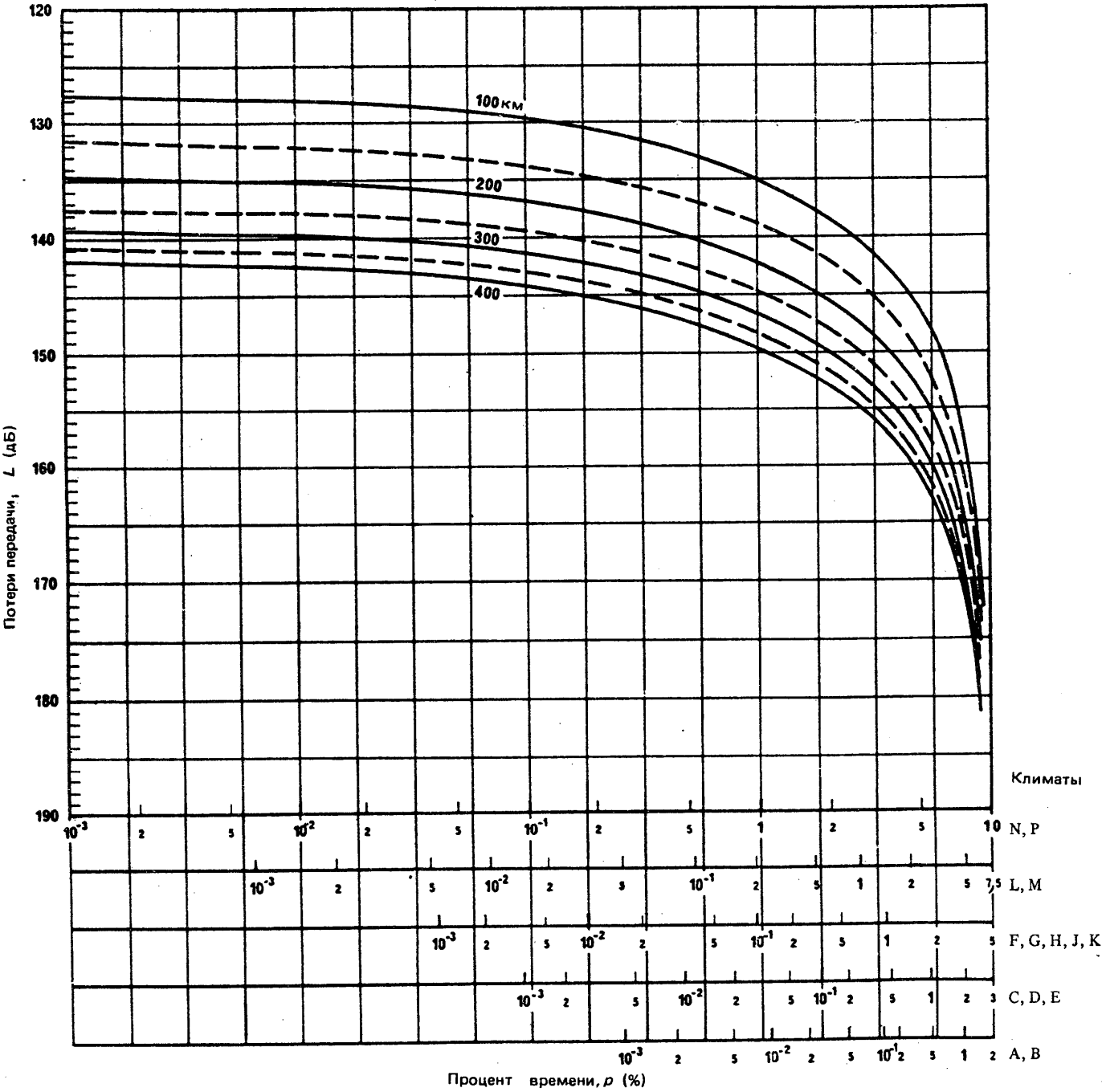


РИСУНОК 17 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f = 14$ ГГц

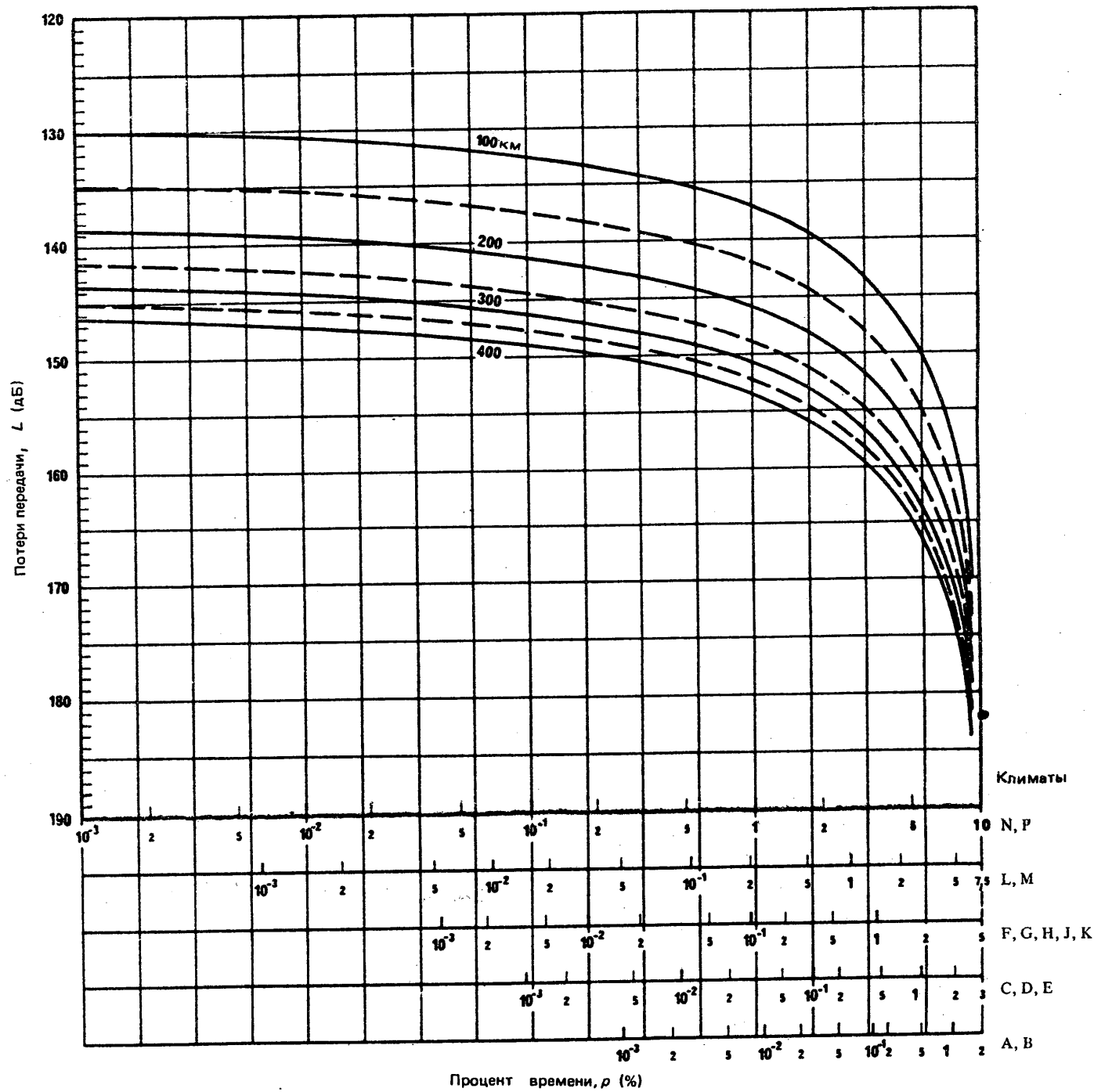


РИСУНОК 18 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f = 18$ ГГц

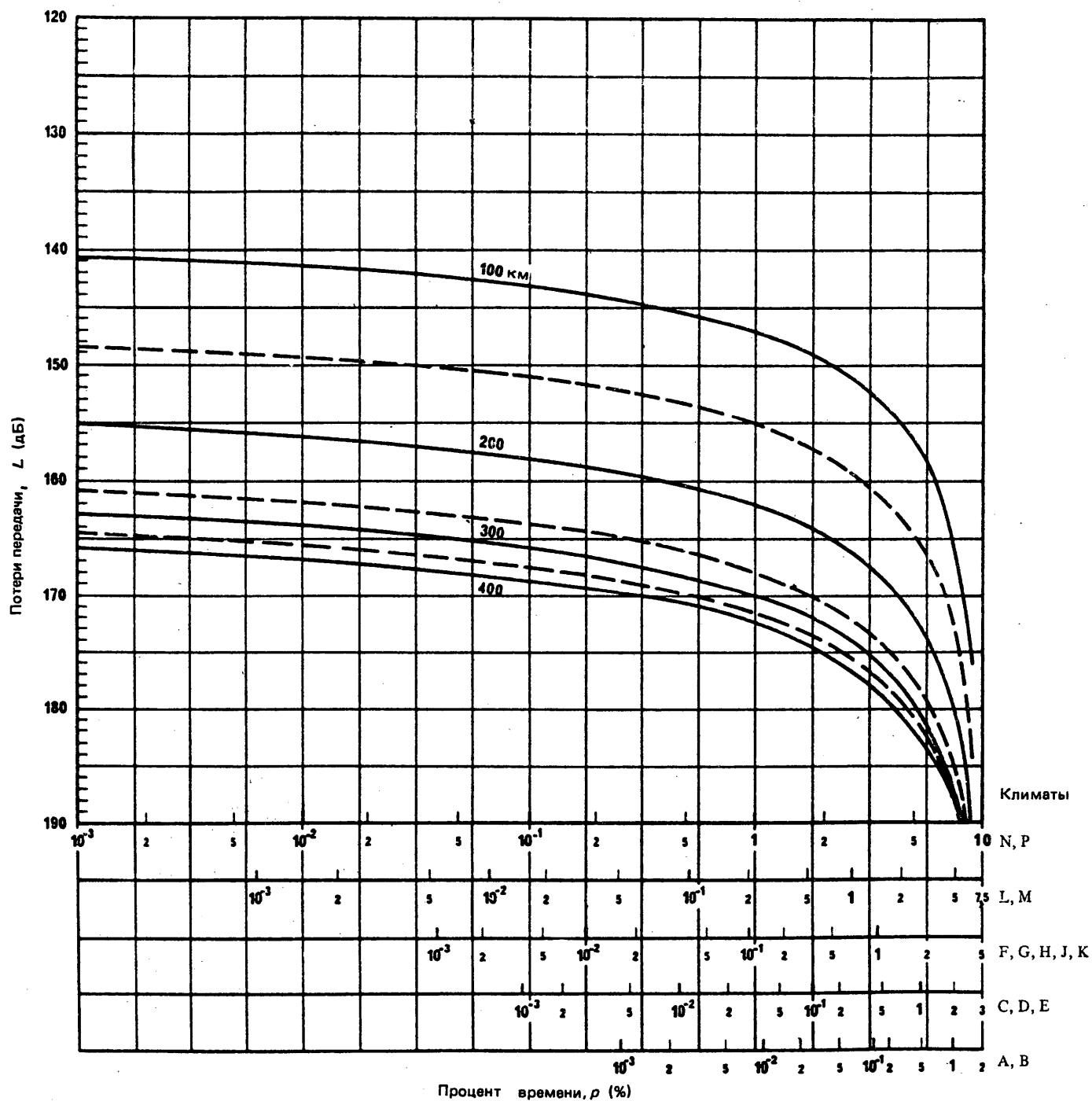


РИСУНОК 19 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f = 22,3$ ГГц

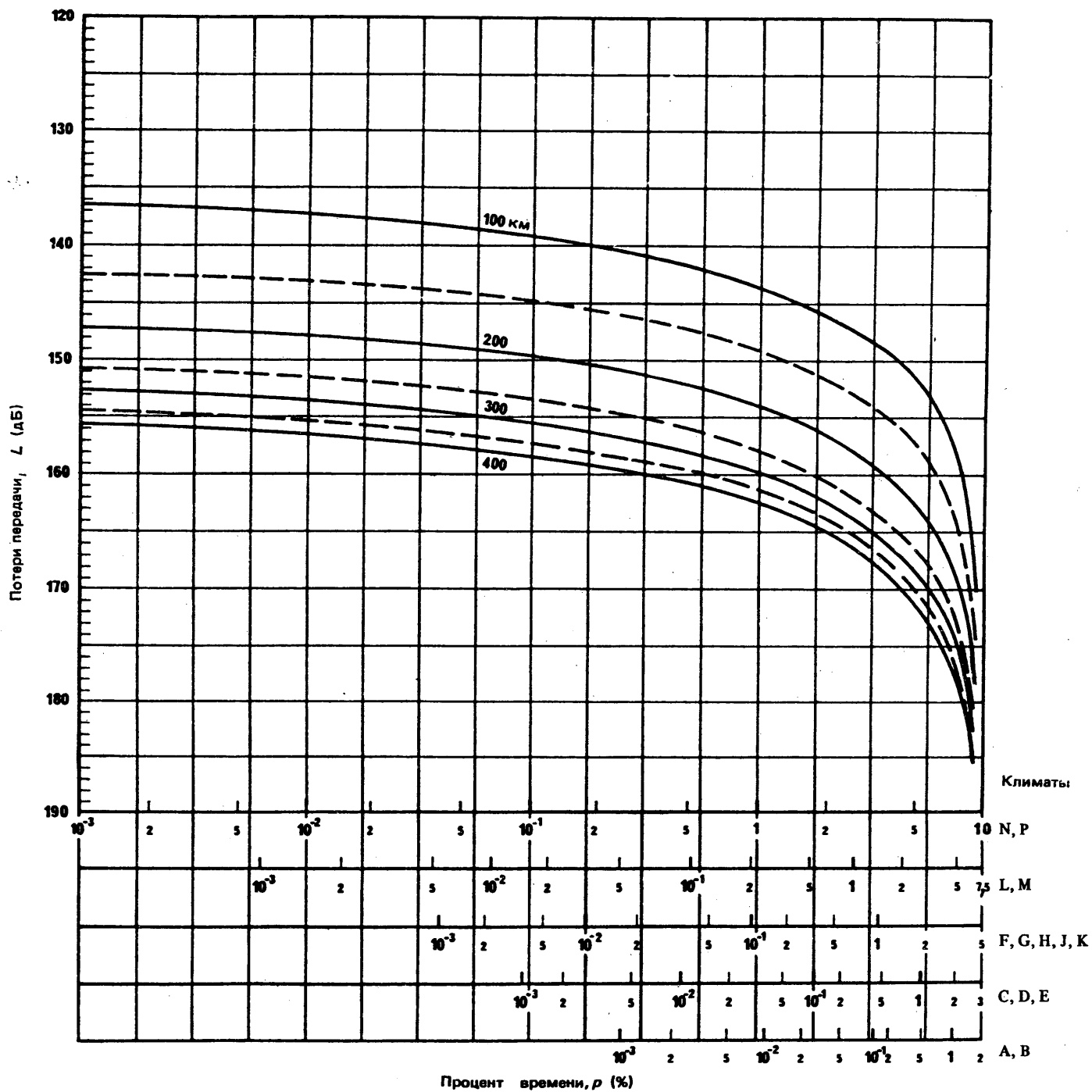


РИСУНОК 20 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f = 28$ ГГц

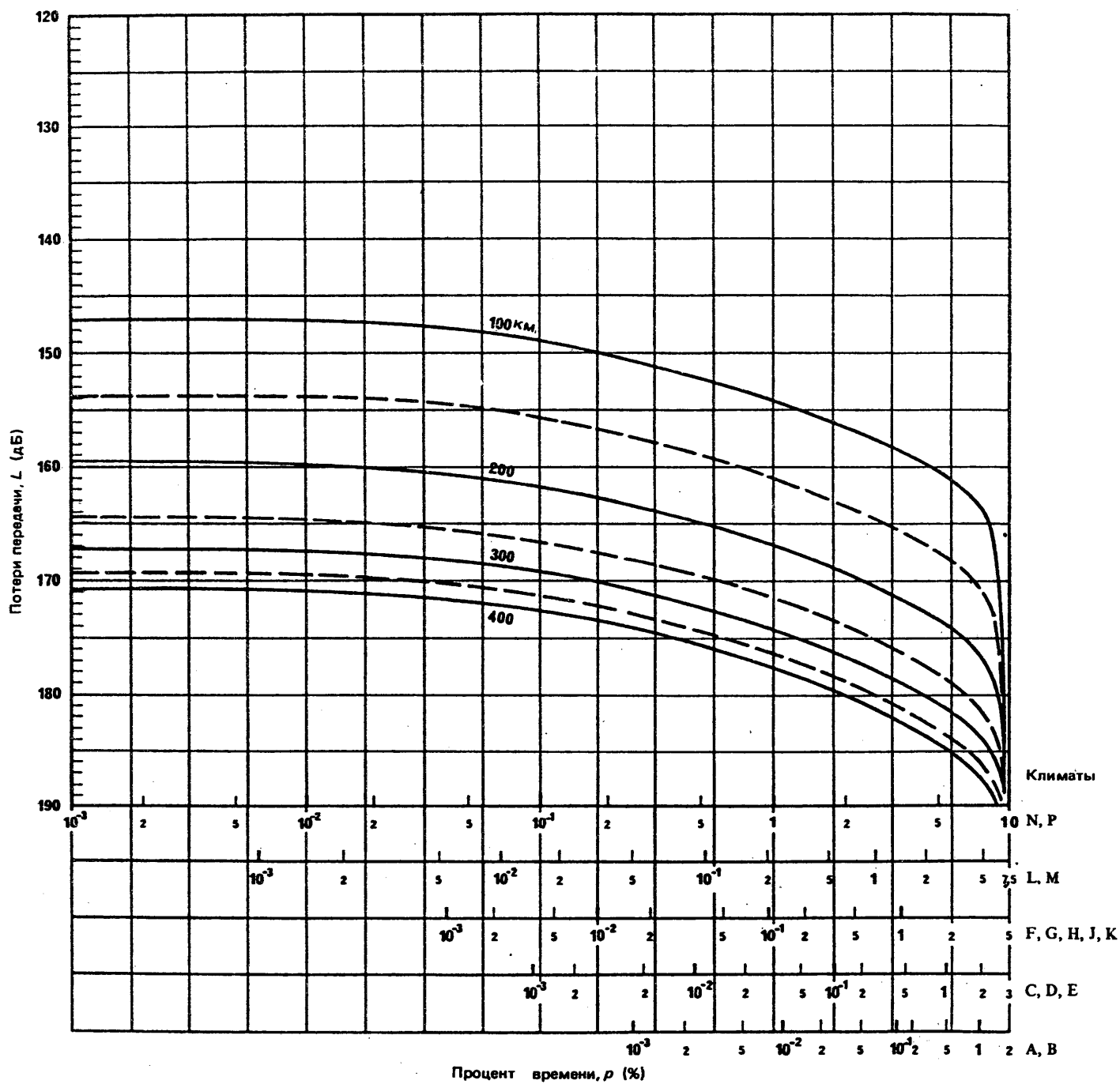


РИСУНОК 21 — Потери передачи в зависимости от процента времени, p , для различных дождевых климатов с расстоянием при рассеянии гидрометеорами в качестве параметра; $f = 40$ ГГц

- (b) Определить среди различных кривых распределения ту кривую, которая полностью лежит ниже кривой $L_2(p_x)$, начерченной согласно вышеизложенному подпункту (а), и которая относится к наименьшему расстоянию. Если эта кривая распределения нигде не касается кривой $L_2(p_x)$, то с помощью линейной интерполяции определить расстояние, соответствующее той кривой распределения, которая коснется кривой $L_2(p_x)$ только в одной точке. Определенное таким образом расстояние обозначить r_c . Если ни одна из имеющихся кривых распределения не лежит полностью ниже кривой $L_2(p_x)$, то следует считать, что $r_c = 370$ км.
- (c) Сравнить расстояние r_c с соответствующим расстоянием в таблице IV; наименьшее из этих двух расстояний будет являться расстоянием гидрометеорологического рассеяния d_r .
- (d) Найти точку на расстоянии Δd в направлении азимута луча антенны земной станции. Эта величина может быть получена из рис. 22, где она изображена в зависимости от угла места ϵ_s основного луча антенны земной станции и от d_r , или из следующей формулы:

$$\Delta d = \frac{(d_r - 40)^2}{17\,000} \cot \epsilon_s \quad \text{км}, \quad (27)$$

где

ϵ_s : угол места основного луча антенны земной станции (в градусах).

- (e) Начертить круг с радиусом d_r и с центром в этой точке. Это и будет координационный контур рассеяния гидрометеорами (координационный контур при распространении по моде (2)). Координационным расстоянием при распространении по моде (2) в данном азимутальном направлении от земной станции будет расстояние от земной станции до координационного контура в данном азимутальном направлении; оно обозначается d_2 .

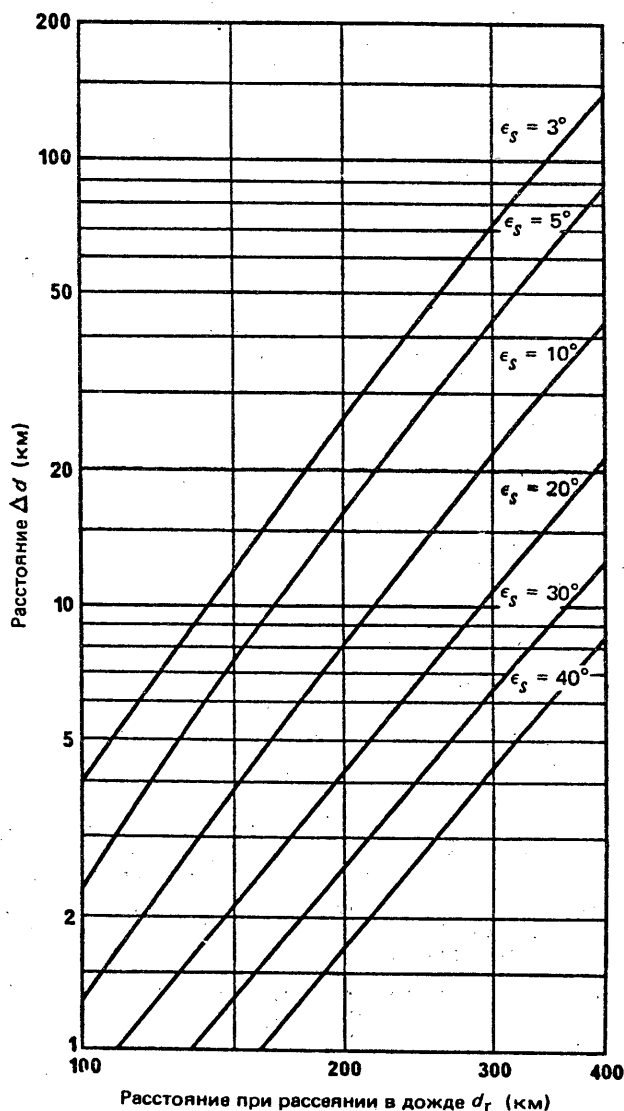


РИСУНОК 22 — Расстояние Δd в зависимости от расстояния при рассеянии гидрометеорами d_r и угла места ϵ_s основного луча антенны земной станции

7. Расчеты с помощью компьютера

Описанные выше процедуры по определению координационных зон и вспомогательных контуров могут быть запрограммированы для обработки на компьютере. С помощью таких программ контуры могут быть автоматически нанесены на карту.

8. Эксплуатационные соображения относительно работы на частотах выше 10 ГГц

На частотах выше 10 ГГц затухание в дожде может ослабить принимаемые сигналы на земной или космической станции в течение малых процентов времени, и этот эффект увеличивается по мере увеличения частоты.

Если запасы мощности на линиях вверх и вниз оказываются недостаточными для поддержания необходимой непрерывности обслуживания, то могут потребоваться разнесенный прием или регулировка мощности, или оба эти метода.

При использовании регулировки мощности на линии вверх для борьбы с затуханием в дожде на трассе Земля — космос увеличение мощности приведет к созданию большего потенциала помех наземным системам, в направлении к которым затухание может и не возрасти. Следовательно, может возникнуть необходимость определить координационные контуры с учетом максимальных мощностей, которые могут излучаться, и процентов времени, в течение которых могут поддерживаться данные уровни управляемой мощности. Очевидно, что при определении координационной зоны необходимо исходить из максимальной мощности, которую может излучать передающая земная станция. Однако мощность передачи будет увеличиваться только тогда, когда затухание в дожде превысит определенную величину. Таким образом, увеличение мощности не приведет к помехе, вызванной эффектом атмосферного волновода, возникающим при ясном небе. Следовательно, максимальная имеющаяся мощность передачи, используемая для определения координационной зоны при распространении по моде (1), должна отличаться от мощности, используемой при распространении по моде (2). В действительности, при распространении по моде (1), по-видимому, следовало бы использовать максимальную мощность передачи, излучаемую в условиях ясного неба, в качестве максимальной имеющейся мощности передачи.

При использовании для борьбы с затуханием метода разнесенного приема координационный контур следует определять для обоих пунктов. Поскольку затухание в основном возникает из-за осадков, каждая из двух станций разнесенного приема будет работать, как правило, только в условиях, когда не превышает определенная величина затухания, то есть до определенной интенсивности дождя, после чего работа переносится на другую станцию. Следовательно, координационные расстояния при рассеянии в дожде следует определять только для той интенсивности дождя, при которой происходит переключение на другую станцию. Поскольку интенсивность дождя при переключении значительно меньше максимальной интенсивности дождя для тех процентов времени, в течение которых должна поддерживаться непрерывность службы, координационные зоны при рассеянии в дожде для обеих станций могут оказаться значительно меньшими, чем при одной станции, используемой без разнесенного приема. Следует отметить, что это преимущество может относиться как к передающим, так и к приемным земным станциям.

9. Подвижные (кроме воздушных подвижных) земные станции

Для того чтобы установить, необходима ли координация для подвижных (кроме воздушных подвижных) земных станций, следует рассчитать координационную зону, в которую должны быть включены все координационные зоны, определенные для каждого пункта в зоне обслуживания, в пределах которой предлагается эксплуатация подвижных земных станций.

Изложенный выше метод может быть использован для этих целей путем определения соответствующих отдельных координационных контуров для достаточно большого числа пунктов как внутри, так и на границе предполагаемой зоны обслуживания и путем определения на их основании составной координационной зоны, которая включает все возможные отдельные координационные зоны. Более подробную информацию см. [МККР, 1978—1982b].

10. Пересмотр данных по распространению радиоволн

Материалы, содержащиеся в пунктах 3, 4 и 6 и в приложении II к данному Отчету, основаны прямо или косвенно на данных по распространению, собранных, обработанных и изложенных в других Рекомендациях и Отчетах МККР. Эти материалы приводятся в форме, аналогичной форме Приложения 28 к Регламенту радиосвязи, для последующего пересмотра в соответствии с Резолюцией № 60 ВАКР-79. Представления о распространении радиоволн меняются по мере появления новых и более достоверных данных, и в связи с такими изменениями может возникнуть необходимость или настоятельная потребность в соответствующей корректировке материалов данного Отчета, касающихся вопросов распространения, на основе результатов работы 5-й Исследовательской Комиссии.

ССЫЛКИ

Документы МККР

[1978-82]: а. 4/7(9/5) (Китайская Народная Республика); б. 4/286 (ВРГ 4/1);

[1986-90]: а. 4/32 (9/63)(Канада); б. 4/356 (9/370)(Канада).

ПРИЛОЖЕНИЕ I

УСИЛЕНИЕ АНТЕННЫ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ В НАПРАВЛЕНИИ НА ГОРИЗОНТ ДЛЯ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ

1. Общие положения

Составляющая коэффициента усиления антенны земной станции в направлении на физический горизонт вокруг земной станции зависит от угла φ между осью основного луча антенны и направлением на горизонт в рассматриваемом направлении. Поэтому необходимо знать угол φ для каждого азимута.

Угол места ϵ , и азимут α , геостационарных спутников при наблюдении последних с земной станции, расположенной на широте ζ , связаны однозначно. На рис. 24 изображены дуги возможных положений геостационарных спутников в прямоугольной системе координат — угол места/азимут, причем каждая кривая соответствует определенной широте земной станции.

Плоскостное представление сферической системы координат ϵ, α , приводит к ошибкам при определении больших величин φ . Однако, поскольку диаграммы направленности антенн при больших углах φ уже не очень чувствительны к изменению угла φ , то при определении усиления антенны в направлении на горизонт степень этих погрешностей незначительна.

Графический метод, описанный ниже, предполагает, что космические станции могут располагаться в любой точке орбитальной дуги. Однако при координации должна использоваться заданная орбитальная позиция. Следовательно, на рис. 25 эта позиция должна быть представлена в виде точки, относительно которой должен определяться угол отклонения от основного луча антенн $\varphi(\alpha)$.

Конкретные относительные долготы спутника могут быть не известны заранее, но даже тогда, когда они имеются, возможность установки дополнительного нового спутника или перемещение существующего заставляет исходить из предположения, что спутники располагаются на всей имеющейся дуге или ее части.

2. Графический метод определения $\varphi(\alpha)$

При правильно выбранных и нанесенных на рис. 24 дуге или сегменте дуги на этом же рис. 24 изображается профиль горизонта $\epsilon(\alpha)$, как это показано на рис. 25, где приводится пример с земной станцией, расположенной на 45° с. ш., для спутника, который может располагаться между относительными долготами 10° з. д. и 45° в. д.

Для каждой точки местного горизонта $\epsilon(\alpha)$ определяется наименьшее расстояние до дуги, которое измеряется по шкале углов места. Пример на рис. 25 показывает определение углового отклонения от оси луча φ для азимута $\alpha (= 210^\circ)$ и угле горизонта $\epsilon (= 4^\circ)$. Измерение φ дает величину 26° .

Если эта операция проведена для всех азимутов (с подходящим шагом, например, 5°), то получается зависимость $\varphi(\alpha)$.

3. Численный метод определения $\varphi(\alpha)$

Для этой цели могут быть использованы следующие выражения:

$$\Psi = \arccos(\cos \zeta \cdot \cos \delta); \quad (28)$$

$$\alpha'_s = \arccos(\tan \zeta \cdot \cot \Psi); \quad (29)$$

$$\alpha_s = \alpha'_s + 180^\circ \quad \text{для земных станций, расположенных в северном полушарии, и спутников, расположенных к западу от земной станции;} \quad (30a)$$

$$\alpha_s = 180^\circ - \alpha'_s \quad \text{для земных станций, расположенных в северном полушарии, и спутников, расположенных к востоку от земной станции;} \quad (30b)$$

$$\alpha_s = 360^\circ - \alpha'_s \quad \text{для земных станций, расположенных в южном полушарии, и спутников, расположенных к западу от земной станции;} \quad (30c)$$

$$\alpha_s = \alpha'_s \quad \text{для земных станций, расположенных в южном полушарии, и спутников, расположенных к востоку от земной станции.} \quad (30d)$$

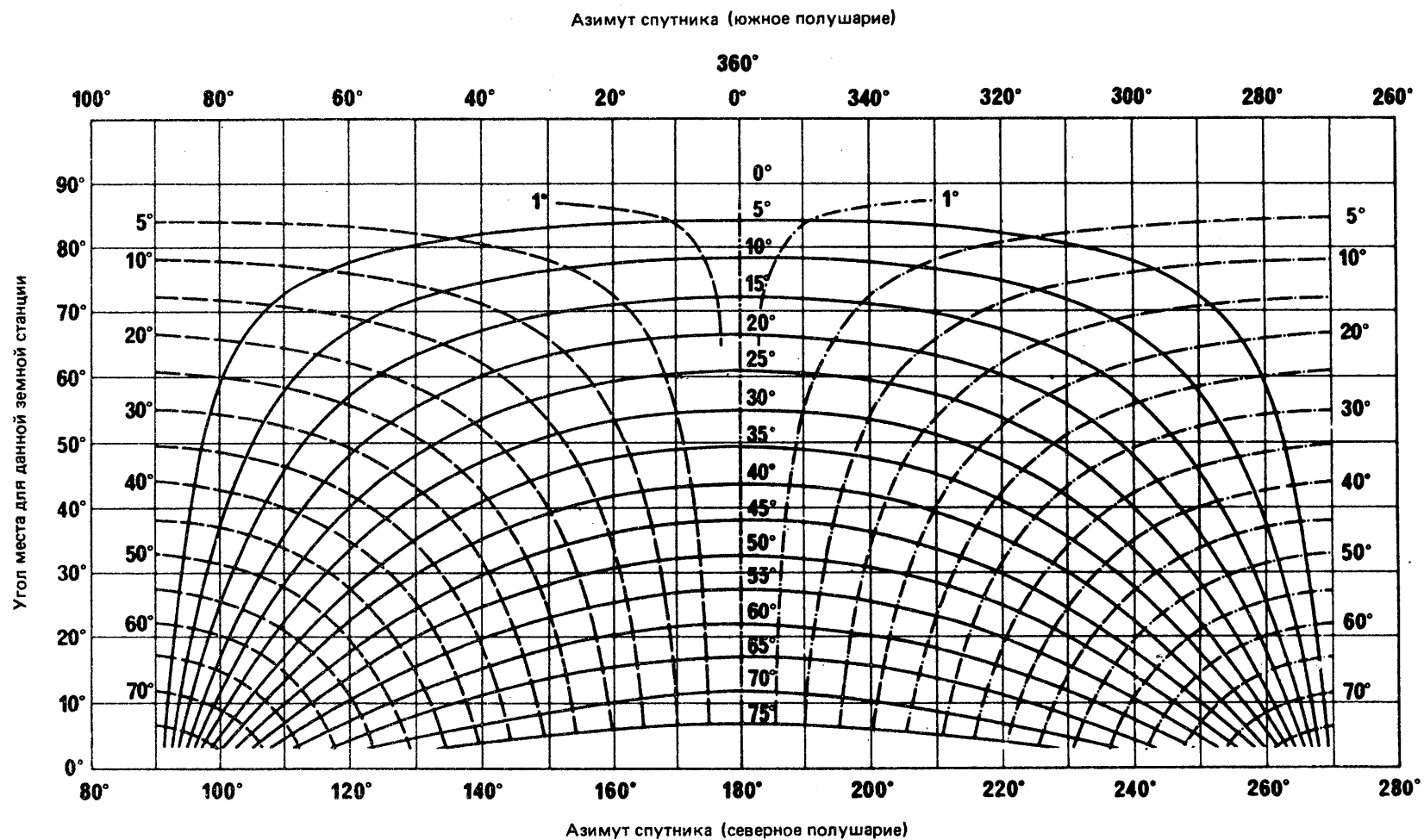
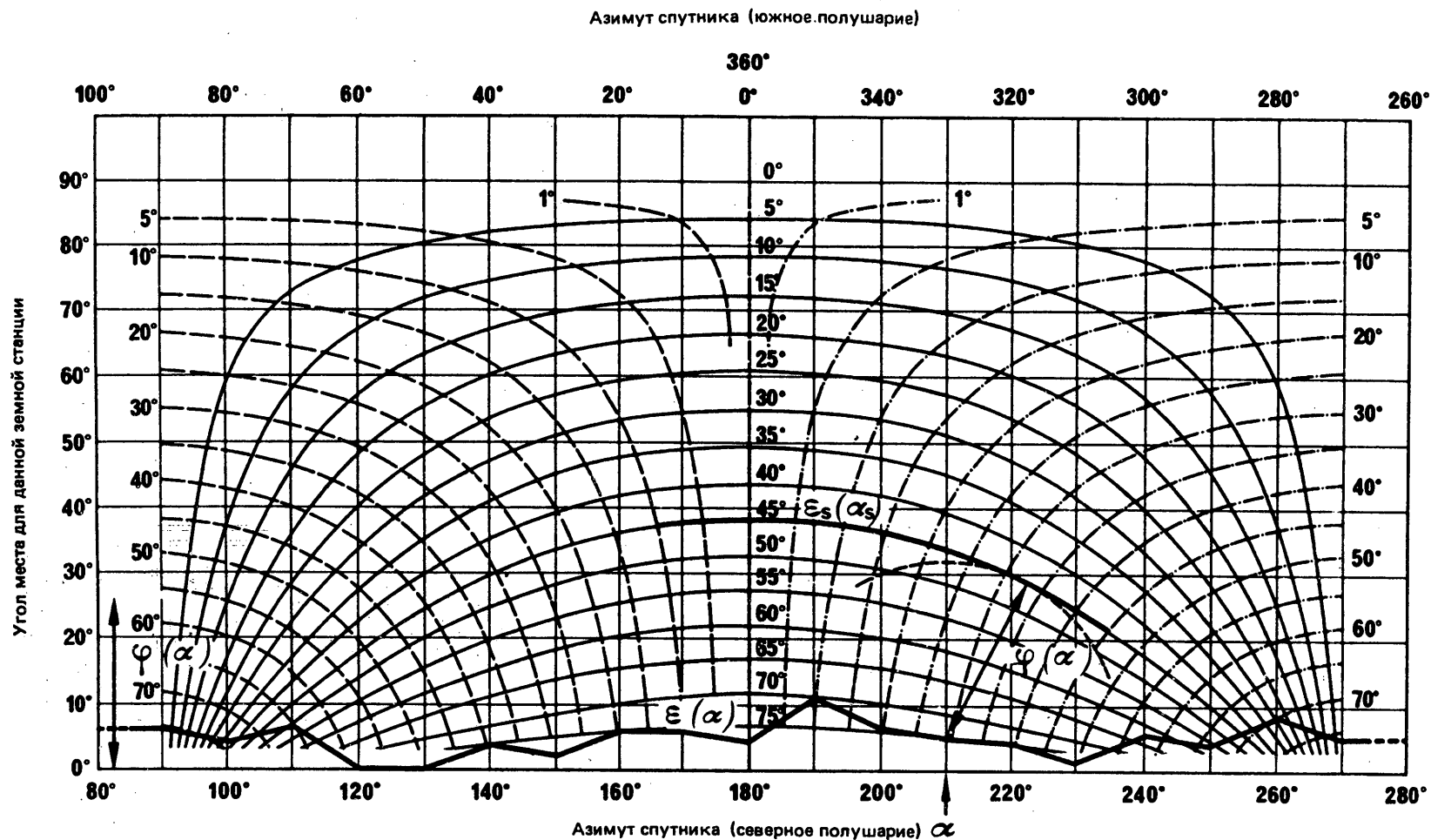


РИСУНОК 24 — Положение дуг геостационарных спутников

- дуга геостационарной орбиты, видимая с земной станции, расположенной на широте ζ
- Разность по долготе между земной станцией и подспутниковой точкой:
- по долготе спутник смещен к востоку от земной станции
- по долготе спутник смещен к западу от земной станции
- долгота спутника совпадает с долготой земной станции

РИСУНОК 25 — Пример определения φ

- дуга геостационарной орбиты, видимая с земной станции, расположенной на широте ζ
- ~~~~~ профиль горизонта $\varepsilon(\alpha)$
- Разность по долготе между земной станцией и подспутниковой точкой:
- по долготе спутник смещен к востоку от земной станции
- по долготе спутник смещен к западу от земной станции
- долгота спутника совпадает с долготой земной станции

$$\varepsilon_s = \arctan \left(\frac{K - \cos \Psi}{\sin \Psi} \right) - \Psi; \quad (31)$$

$$\varphi(\alpha) = \arccos [\cos \varepsilon \cdot \cos \varepsilon_s \cdot \cos (\alpha - \alpha_s) + \sin \varepsilon \cdot \sin \varepsilon_s], \quad (32)$$

где

ζ : широта земной станции;

δ : разность долгот спутника и земной станции;

Ψ : дуга большого круга между земной станцией и подспутниковой точкой;

α_s : азимут спутника при наблюдении с земной станции;

ε_s : угол места спутника при наблюдении с земной станции;

α : азимут рассматриваемого направления;

ε : угол места горизонта для рассматриваемого азимута α ;

$\varphi(\alpha)$: угол между осью основного луча антенны и направлением на горизонт для рассматриваемого азимута α ;

K : отношение радиуса орбиты к радиусу Земли предполагается равным 6,62.

Все дуги, упомянутые выше, даются в градусах.

4. Определение усиления антенны

Зависимость $\varphi(\alpha)$ может использоваться для получения зависимости усиления антенны в направлении на горизонт G (дБ) как функции азимута α путем применения либо реальной диаграммы направленности антенны земной станции, либо формулы, дающей хорошую аппроксимацию. Например, когда отношение диаметра антенны к длине волны не менее 100, должно использоваться следующее выражение:

$$\left. \begin{aligned} G(\varphi) &= G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{при } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) &= G_1 && \text{при } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r \\ G(\varphi) &= 32 - 25 \log \varphi && \text{при } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ \\ G(\varphi) &= -10 && \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \end{aligned} \right\}, \quad (33)$$

где

D : диаметр антенны }
 λ : длина волны } выраженные в одинаковых единицах;

G_1 : усиление первого бокового лепестка $= 2 + 15 \log D/\lambda$;

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\max} - G_1} \quad (\text{градусы});$$

$$\varphi_r = 15,85 (D/\lambda)^{-0,6} \quad (\text{градусы})$$

В случае невозможности для антенны с D/λ меньше 100 использовать вышеуказанную эталонную диаграмму направленности и когда ни измеренные данные, ни соответствующая Рекомендация МККР, принятая заинтересованными администрациями, не могут использоваться вместо нее, администрации могут использовать ниже указанную диаграмму направленности:

$$\left. \begin{aligned} G(\varphi) &= G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda} \varphi \right)^2 && \text{при } 0 < \varphi < \varphi_m \\ G(\varphi) &= G_1 && \text{при } \varphi_m \leq \varphi < 100 \frac{\lambda}{D} \\ G(\varphi) &= 52 - 10 \log \frac{D}{\lambda} - 25 \log \varphi && \text{при } 100 \frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ \\ G(\varphi) &= 10 - 10 \log \frac{D}{\lambda} && \text{при } 48^\circ < \varphi \leq 180^\circ \end{aligned} \right\}, \quad (34)$$

где

D : диаметр антенны }
 λ : длина волны } выраженные в одинаковых единицах;

G_1 : усиление первого бокового лепестка $= 2 + 15 \log D/\lambda$;

$$\varphi_{\pi} = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{\max} - G_1} \quad (\text{градусы}).$$

Вышеуказанные диаграммы направленности могут быть изменены по мере надобности с целью получения более точного представления действительной диаграммы направленности.

В случаях, когда D/λ не дано, его можно определить по формуле:

$$20 \log \frac{D}{\lambda} \approx G_{\max} - 7,7,$$

где

$G_{\max}$: коэффициент усиления основного лепестка антенны в дБ.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАЦИОННОГО РАССТОЯНИЯ ДЛЯ СМЕШАННЫХ ТРАСС

1. Две зоны

Процедура, которой необходимо следовать в случае смешанной трассы, включающей две зоны, проиллюстрирована примером, приведенным на рис. 26(а). Земная станция расположена в Зоне А на расстоянии 75 км от Зоны В. Графическое представление, о котором речь идет ниже, особенно полезно в том случае, если имеет место более чем одна граница между зонами, как это показано в данном примере.

В приведенном ниже примере предполагается, что координационные потери — 180 дБ, частота — 20 ГГц, а процент времени составляет 0,01%. Процедура в данном случае следующая:

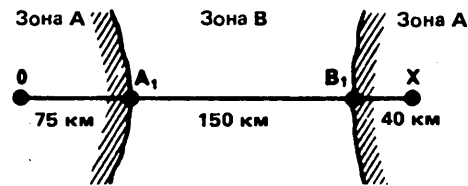
- 1.1 определяем расстояние, находящееся полностью в Зоне А, которое будет создавать заданные координационные потери. Отмечаем это расстояние (в данном случае оно равно 160 км) от начала координат вдоль оси абсцисс линейного графика, обозначаем его точкой А (рис. 26 (b));
- 1.2 определяем расстояние, находящееся полностью в Зоне В, которое будет создавать точно такие же координационные потери. Отмечаем это расстояние (в данном случае оно составляет 530 км) от начала координат вдоль оси ординат на этом же графике, обозначаем его точкой В;
- 1.3 чертим прямую линию между точками А и В, отмечаящими эти расстояния от начала координат;
- 1.4 начиная с начала координат, откладываем расстояние в 75 км от земной станции до Зоны В по оси абсцисс графика и обозначаем точкой A_1 ;
- 1.5 начиная от точки A_1 , откладываем длину трассы в Зоне В 150 км параллельно оси ординат на графике и обозначаем его точкой B_1 ;
- 1.6 оставшееся расстояние в следующей части Зоны А измеряется параллельно оси абсцисс из точки B_1 до пересечения с кривой смешанной трассы, обозначенного Х. На рис. 26(b) это расстояние составляет 40 км;
- 1.7 координационное расстояние представляет собой сумму расстояний OA_1 , A_1B_1 и B_1X и равно

$$75 + 150 + 40 = 265 \text{ км}$$

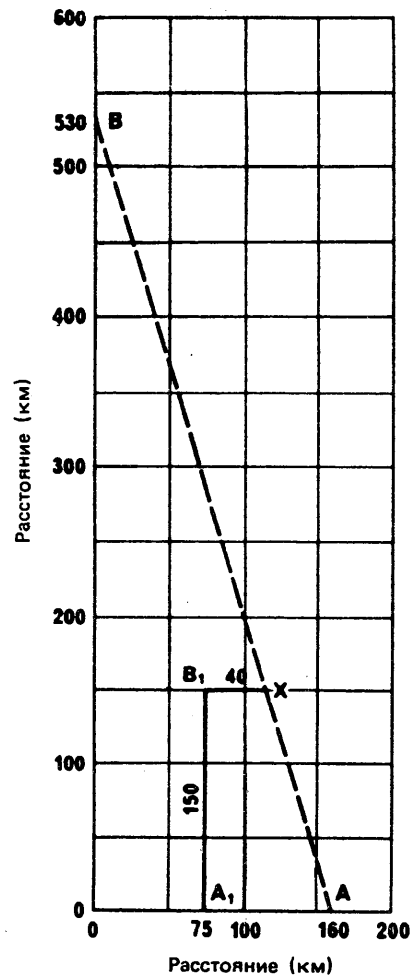
2. Три зоны

В некоторых особых случаях смешанная трасса включает все три радиоклиматические Зоны А, В и С. Эту проблему можно решить путем добавления третьего измерения в процедуру, которую следует использовать для смешанных трасс, включающих только две зоны. Теоретически это означает, что должна определяться третья координата для точки, имеющей координаты, соответствующие известным расстояниям в первых двух зонах, и лежащей в плоскости, определенной тремя точками на осях Х, Y и Z, представляющих, соответственно, расстояния в Зонах А, В и С, дающих требуемые основные потери передачи.

На практике эту процедуру можно свести к простому графическому методу, показанному на рис. 27(а), принимая в данном примере координационные потери (L_1), равные 180 дБ на частоте 20 ГГц. Требуется определить координационное расстояние от земной станции в направлении, указанном на рис. 27(а). Здесь земная станция расположена в Зоне А на расстоянии 75 км (OA_1) в заданном азимутальном направлении от Зоны В. В этом же азимутальном направлении протяженность трассы в Зоне В составляет 150 км (A_1B_1), и за этим следует неизвестная часть трассы в Зоне С (рис. 27(а)).



(a)



(b)

РИСУНОК 26 — Пример определения координационного расстояния для смешанных трасс, включающих Зоны А и В

Применяемая в данном случае процедура должна быть следующей (рис. 27(b)):

- 2.1 повторяем ту же процедуру, что и для смешанных трасс, включающих только две зоны, рассмотренную выше, в пунктах 1.1 — 1.5, и далее:
- 2.2 проводим от точки B_1 линию, параллельную линии АВ, до пересечения с осью абсцисс и обозначаем ее точкой D;

ПРИЛОЖЕНИЕ III

КЛАССИФИКАЦИЯ ДОЖДЕВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН

Как показано на рис. 28, земной шар поделен на ряд дождевых климатических зон, имеющих различные характеристики осадков. Кривые, показанные на рис. 29, представляют обобщенные распределения интенсивности осадков, каждое из которых применимо к нескольким дождевым климатическим зонам рис. 28 и соответствует одной из шкал на оси абсцисс рис. 12-21.

Чтобы построить кривые на рис. 12-21, распределения осадков, изображенные на рис. 29, были продолжены от 0,3% к таким большим процентам времени p_c , при которых предполагается, что интенсивность осадков приближается к нулю. Для этого была использована формула

$$R(p) = R(0,3\%) \left[\frac{\log(p_c/p)}{\log(p_c/0,3)} \right]^2 \quad \text{мм/ч,}$$

а также следующие значения $R(0,3\%)$ и p_c :

Дождевая климатическая зона	$R(0,3\%)$ (мм/ч)	p_c (%)
A, B	1,5	2
C, D, E	3,5	3
F, G, H, J, K	7,0	5
L, M	9,0	7,5
N, P	25,0	10

Этот метод пригоден для численной оценки протяженности зоны рассеяния в дожде.

Распределения интенсивности осадков на рис. 29 численно аппроксимируются следующими выражениями:

Климатические зоны A, B

$$R = 1,1 p^{-0,465} + 0,25 [\log(p/0,001) \log^3(0,3/p)] - [|\log(p/0,1)| + 1,1]^{-2} \quad \text{мм/ч;}$$

Климатические зоны C, D, E

$$R = 2 p^{-0,466} + 0,5 [\log(p/0,001) \log^3(0,3/p)] \quad \text{мм/ч;}$$

Климатические зоны F, G, H, J, K

$$R = 4,17 p^{-0,418} + 1,6 [\log(p/0,001) \log^3(0,3/p)] \quad \text{мм/ч;}$$

Климатические зоны L, M

$$R = 4,9 p^{-0,48} + 6,5 [\log(p/0,001) \log^2(0,3/p)] \quad \text{мм/ч;}$$

Климатические зоны N, P

$$R = 15,6 \{p^{-0,383} + [\log(p/0,001) \log^{1,5}(0,3p)]\} \quad \text{мм/ч}$$

при $0,001 \leq p \leq 0,3\%$.

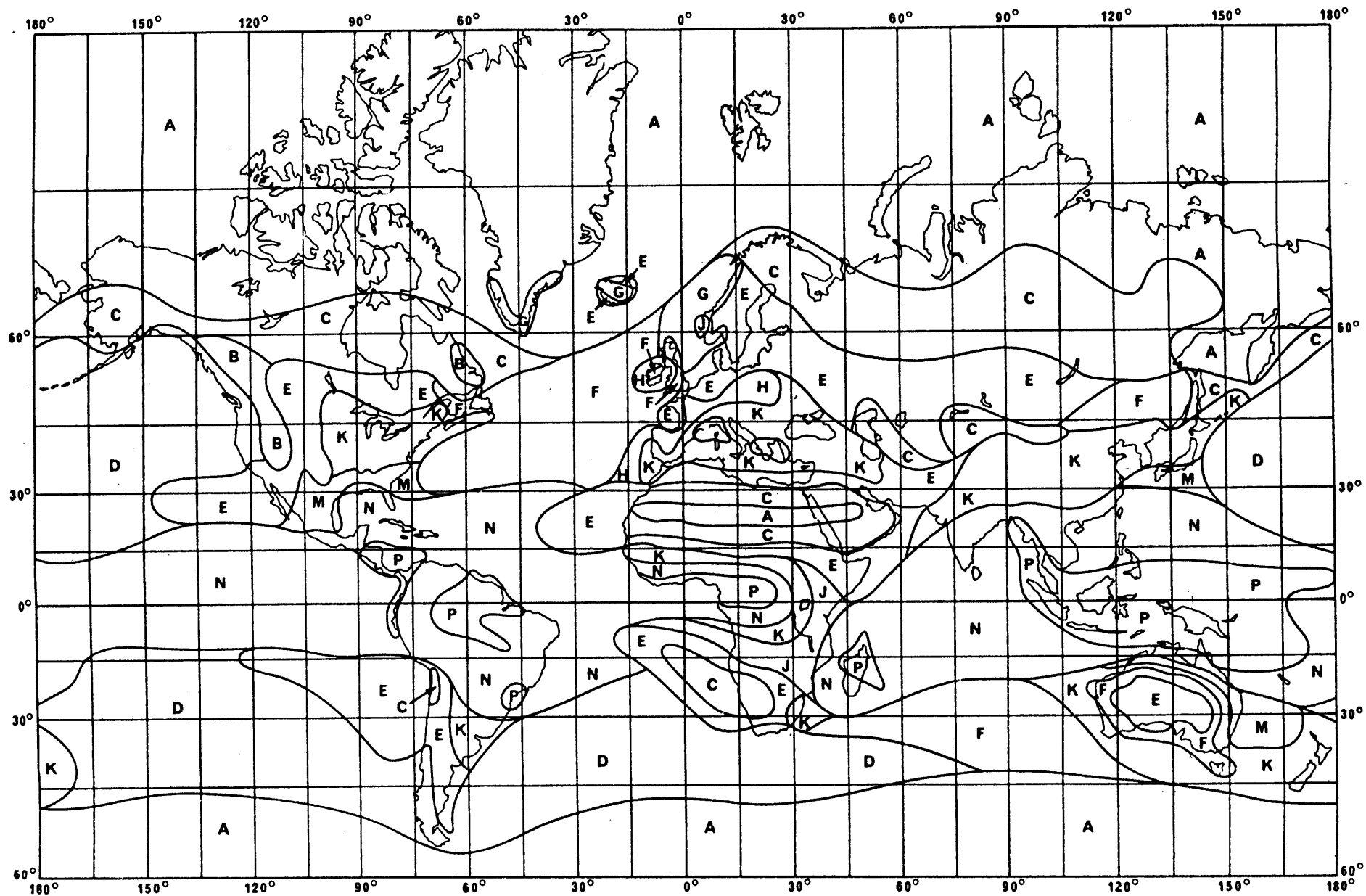


РИСУНОК 28 — Дождевые климатические зоны мира

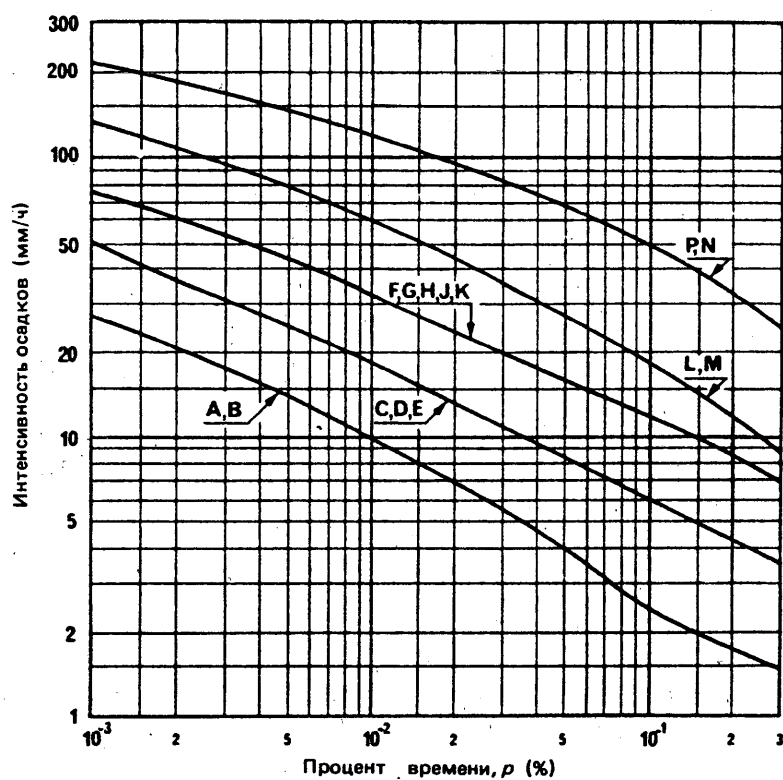


РИСУНОК 29 — Обобщенные интегральные распределения интенсивности осадков для дождевых климатических зон, представленных на рис. 28

ДОПОЛНЕНИЕ I

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАЦИОННОГО
РАССТОЯНИЯ ДЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ПО МОДЕ (1),
ОПИСАННОЙ В ОТЧЕТЕ 382

В этом Дополнении изложен альтернативный метод расчета, предназначенный для определения координационного расстояния на наземных трассах помех при распространении по моде (1).

Администрациям предлагается сравнить этот новый метод с методом, описанным в пункте 3 основного текста данного Отчета и ознакомить МККР с полученными результатами, с тем чтобы последний мог принять решение относительно одобрения этого метода определения координационного расстояния.

С целью облегчить такую проверку новый метод определения координационного расстояния при распространении по моде (1) сформулирован в данном Дополнении в форме, пригодной для прямой замены пункта 3.1 и пункта 3.2 Отчета 382.

3.1 Радиоклиматические зоны

При расчете координационного расстояния для распространения по моде (1) весь земной шар удобно разделить на три основных радиоклиматических региона, называемых Зонами А, В и С. Эти зоны определяются следующим образом:

- Зона А: вся суша;
- Зона В: «холодные» моря, океаны и другие большие водные пространства (например, покрывающие круг диаметром по крайней мере 100 км), расположенные на широтах выше 30°, за исключением Средиземного и Черного морей;
- Зона С: «теплые» моря, океаны и другие большие водные пространства (например, покрывающие круг диаметром по крайней мере 100 км), расположенные на широтах ниже 30°, а также Средиземное и Черное моря.

3.2 Расчет координационного расстояния для трасс, проходящих в одной радиоклиматической зоне

Координационное расстояние для распространения по моде (1) определяется путем сравнения минимальных допустимых основных потерь передачи (см. пункт 2.2) между земной станцией и гипотетической наземной станцией с прогнозируемыми основными потерями передачи, зависящими от расстояния. Расстояние, определенное путем приравнивания величин минимальных допустимых и прогнозируемых основных потерь передачи, и есть координационное расстояние.

Следующий материал представлен в двух видах. В пункте 3.2.1 представлены основные формулы, с помощью которых может быть вычислено координационное расстояние. В пункте 3.2.2 представлен графический метод для определения координационного расстояния.

3.2.1 Численный метод

Прогнозируемые основные потери передачи определяются по формуле:

$$L_b(p_x) = U + 20 \log f + Vf^{1/3} (148 \theta - 50) + d(Vf^{1/3} + \beta_o + \beta_v) \quad \text{дБ}, \quad (6)$$

где

f : рассматриваемая частота (ГГц);

p_x : проценты времени (%);

θ : угол места горизонта * на земной станции (градусы);

d : длина трассы (км);

β_o : коэффициент поглощения в кислороде (дБ/км);

β_v : коэффициент поглощения в водяных парах (дБ/км).

Параметры U и V зависят от радиоклиматической зоны и процента времени p_x :

— для Зоны А:

$$\begin{aligned} U_A &= 140 + 10 \log p_x + 1,5 (\log p_x)^2 \\ V_A &= 0,11 + 0,01 \log p_x \end{aligned} \quad (7a)$$

* Угол горизонта θ определяется здесь как угол, наблюдаемый из центра антенны земной станции, между горизонтальной плоскостью и лучом, направленным на видимый физический горизонт в заданном направлении.

— для Зоны В:

$$\begin{aligned} U_B &= 130 + 10 \log p_x + 1,5 (\log p_x)^2 \\ V_B &= 0,075 + 0,01 \log p_x \end{aligned} \quad (7b)$$

— для Зоны С:

$$\begin{aligned} U_C &= 130 + 10 \log (p_x/3) + 1,5 [\log (p_x/3)]^2 \\ V_C &= 0,075 + 0,01 \log (p_x/3) \end{aligned} \quad (7c)$$

Коэффициент поглощения в кислороде зависит от частоты:

$$\beta_o = \left[\frac{7,1}{f^2 + 0,33} + \frac{4,5}{(f-57)^2 + 0,98} \right] f^2 / 10^3 \quad \text{дБ/км для } f \leq 40 \text{ ГГц.} \quad (8)$$

Коэффициент поглощения в водяных парах зависит как от частоты, так и от плотности водяных паров ρ :

$$\beta_v = \left[6,73 + \frac{300}{(f-22,3)^2 + 7,3} \right] f^2 \rho / 10^6 \quad \text{дБ/км для } f \leq 40 \text{ ГГц,} \quad (9)$$

где ρ : плотность водяных паров (г/м^3) и зависит от радиоклиматической зоны. Следует использовать следующие величины ρ :

- для Зоны А: $\rho = 5 \text{ мг/м}^3$,
- для Зоны В: $\rho = 7,5 \text{ мг/м}^3$,
- для Зоны С: $\rho = 10 \text{ мг/м}^3$.

Минимальные допустимые основные потери передачи даются в виде следующего интегрального распределения во времени, определяемого для $p \leq p_x \leq 20\%$:

$$L_m(p_x) = P_t + G_e + 42 + \Delta G - P_r(p) + M(p) \left[1 - \frac{(9 - 5 \log p_x)^{0,5} - 1,58}{(9 - 5 \log p)^{0,5} - 1,58} \right] \quad \text{дБ,} \quad (10)$$

где

G_e : усиление антенны земной станции в направлении на горизонт (дБ);

ΔG : разность (в дБ) между предполагаемым максимальным усилением антенны наземной станции и величиной 42 дБ. В таблицах I и II, соответственно, приведены величины ΔG для различных полос частот.

Все прочие параметры определены ранее. Следует отметить, что процент времени p_x является независимой переменной; процент времени p связан с критерием кратковременной помехи.

Для определения координационного расстояния следует приравнять правые части формул (6) и (10) и рассчитать расстояние d для всех процентов времени p_x от p до 20%. Наибольшее из полученных таким образом расстояние является координационным расстоянием d_1 в рассматриваемом азимутальном направлении.

В большинстве реальных случаев d_1 соответствует $p_x = p$. Для подтверждения этого полезно определить сначала d только для $p_x = p$ и $p_x = 10p$. Если $d(p_x = p) > d(p_x = 10p)$, то $d(p_x = p) = d_1$, т. е. представляет интерес только процент времени критерия кратковременной помехи.

Вышеуказанные расчеты приводят к определению d_1 при условии, что вся предполагаемая трасса помехи проходит в одной радиоклиматической зоне. Расчеты d_1 для трасс со смешанными зонами см. в пункте 3.3.

3.2.2 Графический метод

Для пользователей может оказаться удобным графический метод определения d_1 . Однако формула (6), которая является основой для графического метода, содержит пять переменных: $L_b(p_x)$, p_x , f , θ и d , каждая из которых меняется в широких пределах. Имеется и шестая переменная: радиоклиматическая зона, которая, однако, не создает затруднений. В высшей мере целесообразно исключить из переменных угол горизонта земной станции θ и сделать его объектом отдельных расчетов при определении d_1 .

В этом случае формулу (6) можно преобразовать:

$$L_1(p_x) = L_b(p_x) - k\theta = U + 20 \log f + d(Vf^{1/3} + \beta_0 + \beta_v) - 50 Vf^{1/3} \quad \text{дБ}, \quad (11)$$

где

$$k = 148 Vf^{1/3} \quad \text{дБ/градусы} \quad (12)$$

На рис. 31—40 показано распределение $L_1(p_x)$ в зависимости от p_x с расстоянием в качестве параметра для трех радиоклиматических зон, причем каждая представлена различными шкалами на оси абсцисс. Каждый из рисунков относится к одной частоте.

На рис. 30 представлена зависимость коэффициента k от частоты для процентов времени от 0,001 до 1,0% для трех радиоклиматических зон.

Для определения координационного расстояния необходимо сделать следующее:

- Начертите кривую основных координационных потерь, полученных как разность

$$L_1(p_x) = L_m(p_x) - k\theta \quad (13)$$

формул (10) и (12)*, для всех процентов времени от p до 1% на соответствующем рисунке из рис. 31—40, используя подходящую шкалу на оси абсцисс. Будет получена кривая, начинающаяся выше величины p (процент времени, связанный с критериями кратковременной помехи) и опускающаяся вниз вправо.

- Найдите среди имеющихся на рисунке кривых такую кривую, которая полностью лежит ниже построенного участка кривой, но касается ее в одной точке. Расстояние, которым эта кривая помечена, является координационным расстоянием d_1 . Если ни одна из имеющихся кривых не касается построенного участка кривой, следует с помощью интерполяции оценить расстояние, соответствующее какой-либо кривой, которая касалась бы построенного участка кривой в одной точке, но лежала бы полностью ниже его. Это расстояние является координационным расстоянием d_1 .

Примечание. — Обычно обнаруживается, что точка, в которой касаются кривые, является точкой, соответствующей малому проценту времени p . Чтобы убедиться в том, что это действительно так, нет необходимости в построении всего семейства распределения $L_1(p_x)$, а можно обойтись лишь двумя точками его для p и $10p$. Если расстояние для $p_x = p$ больше, чем расстояние для $p_x = 10p$, то расстояние, соответствующее p , определяет координационное расстояние d_1 и нет необходимости исследовать другие величины p_x .

* Или из рис. 30 в отношении k .

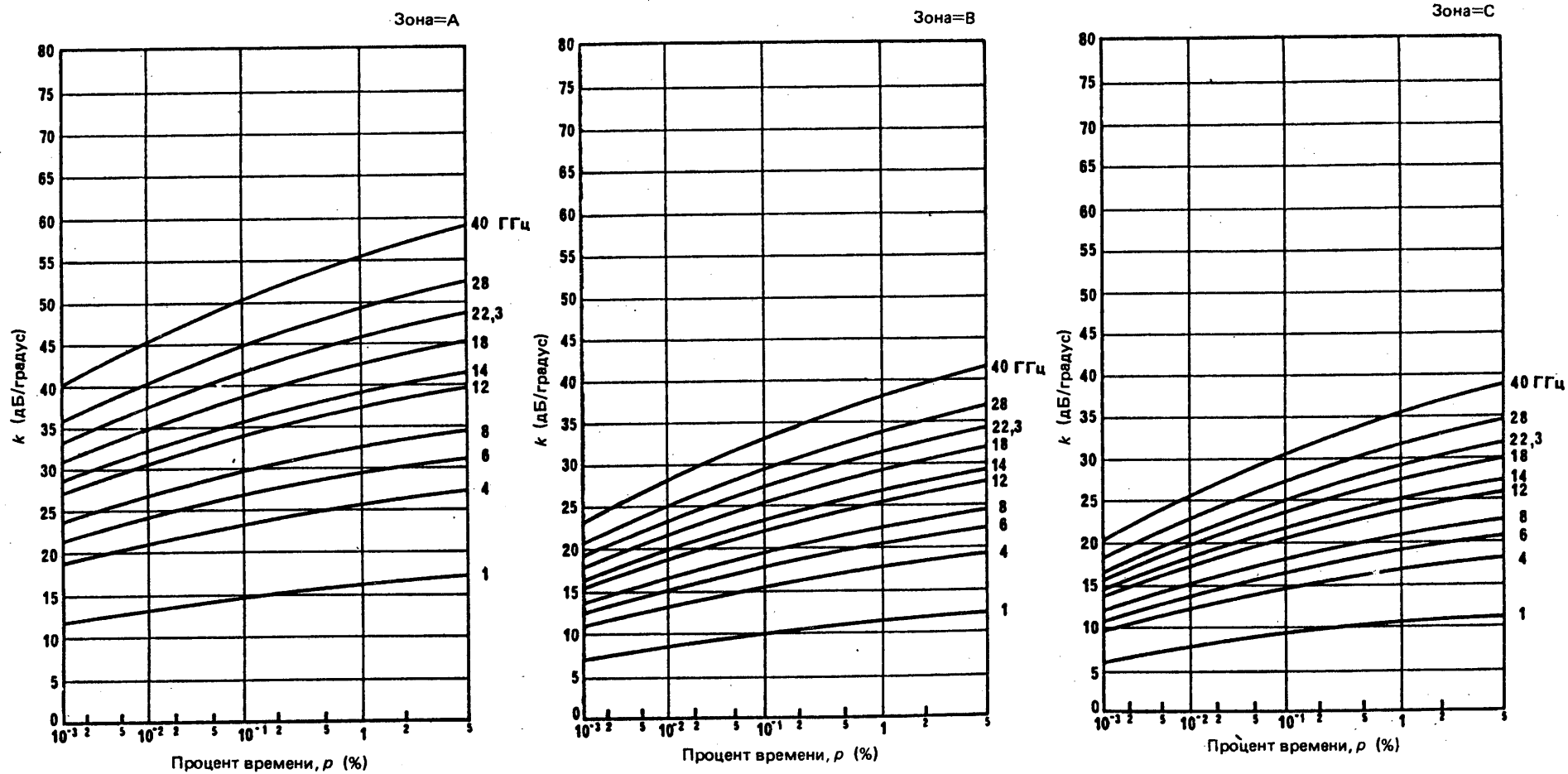


РИСУНОК 30 — Зависимость коэффициента k (дБ/градус) от процента времени, p , для нескольких значений частоты в ГГц

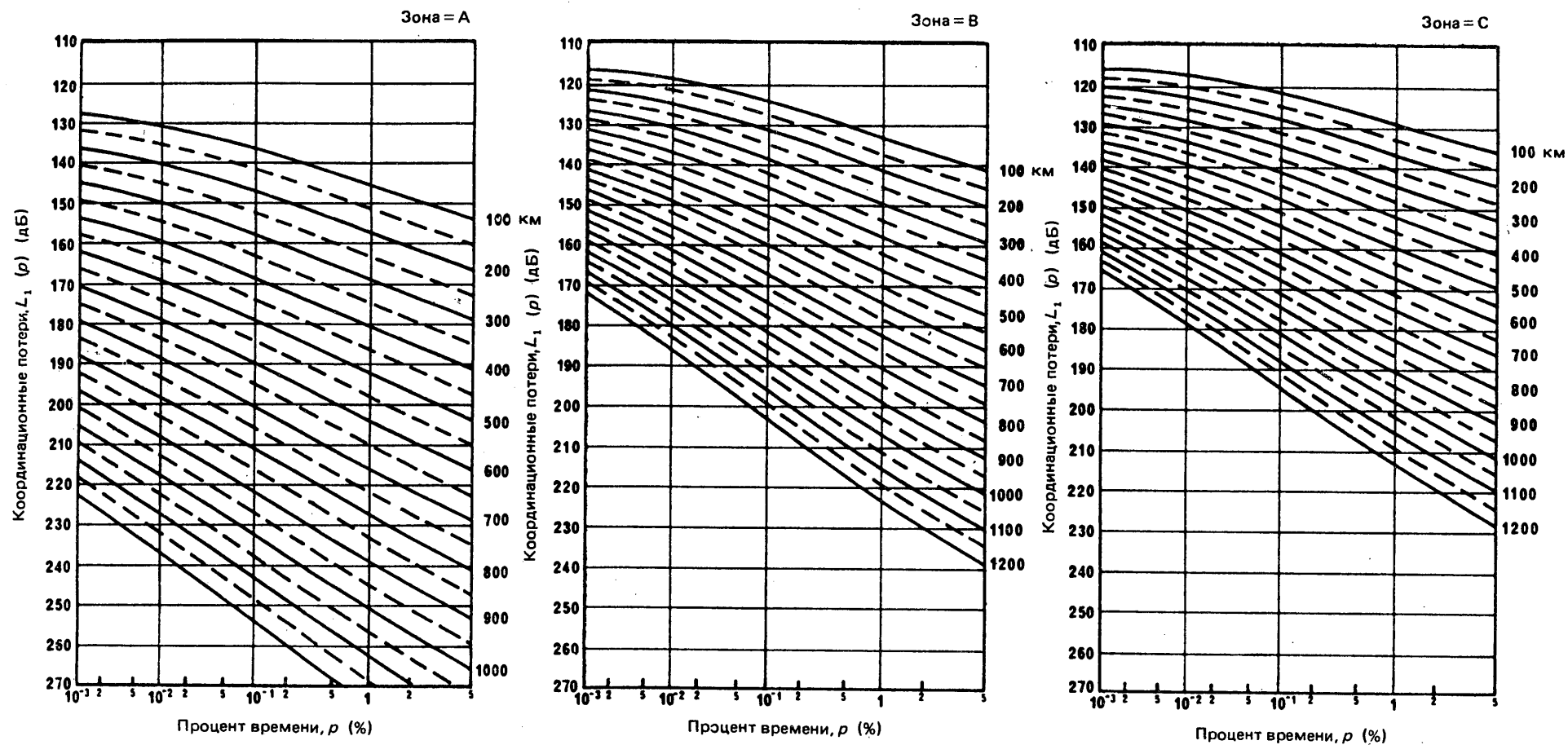


РИСУНОК 31 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км
Частота = 1,0 ГГц

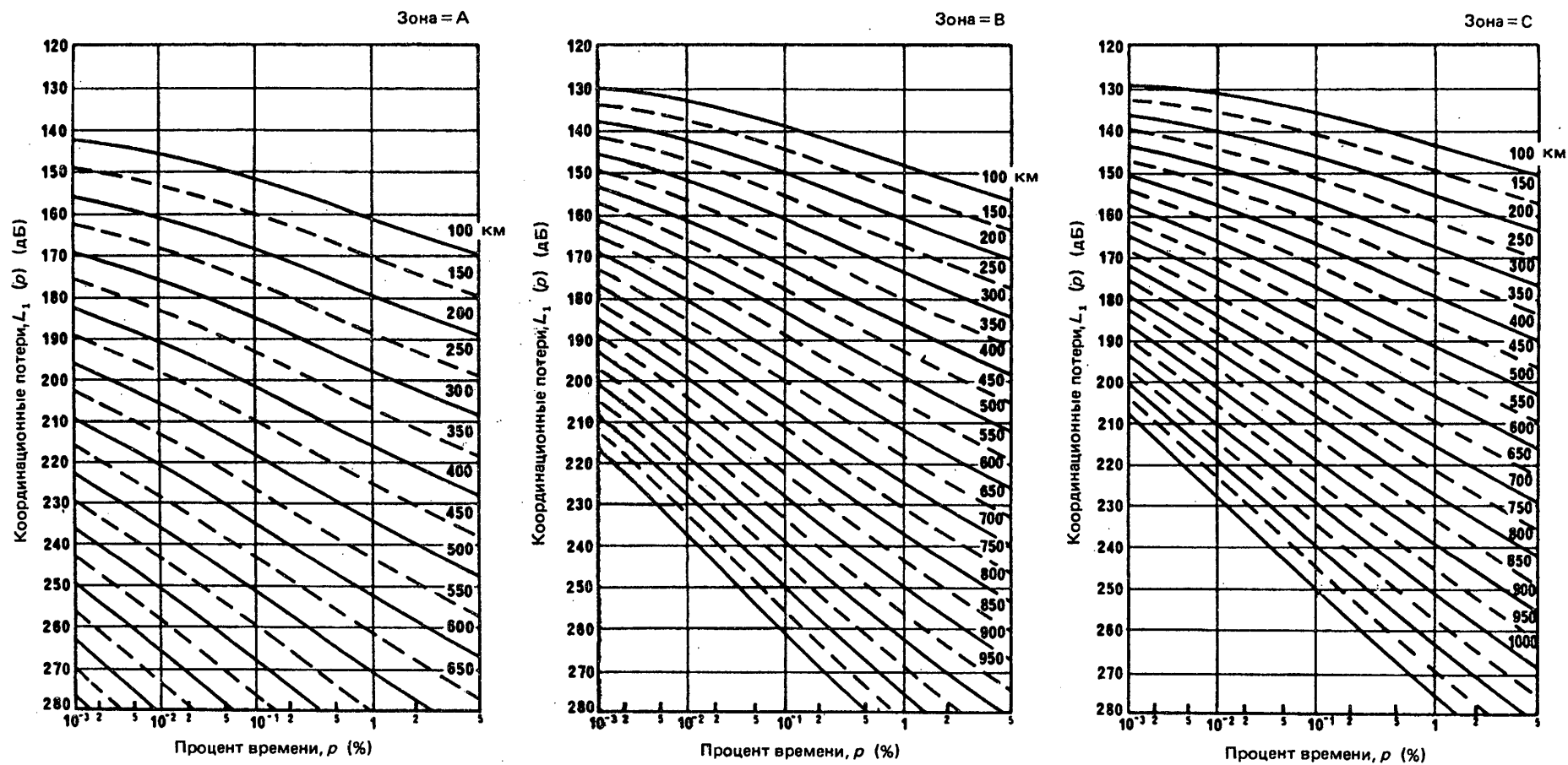


РИСУНОК 32 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 4,0 ГГц

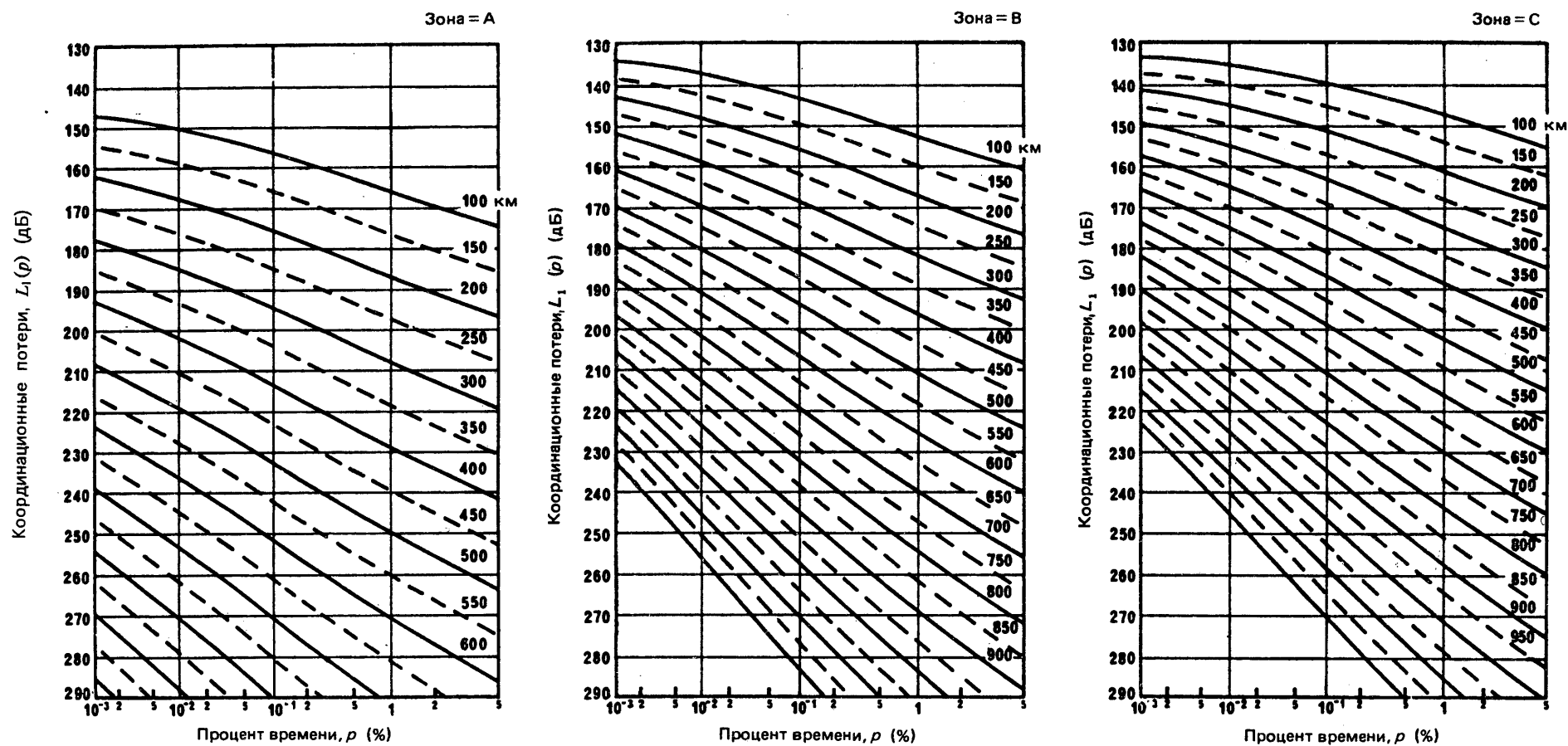


РИСУНОК 33 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 6,0 ГГц

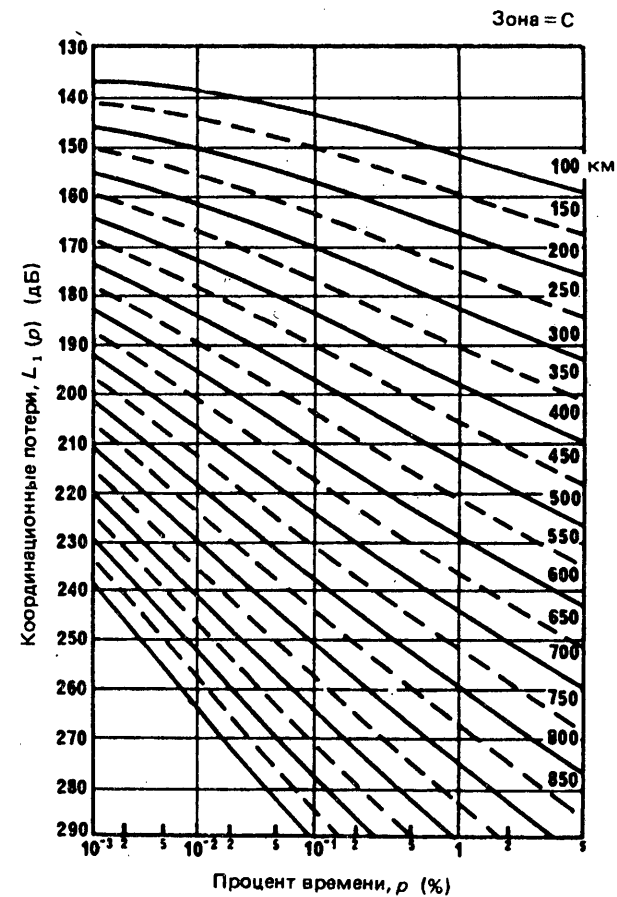
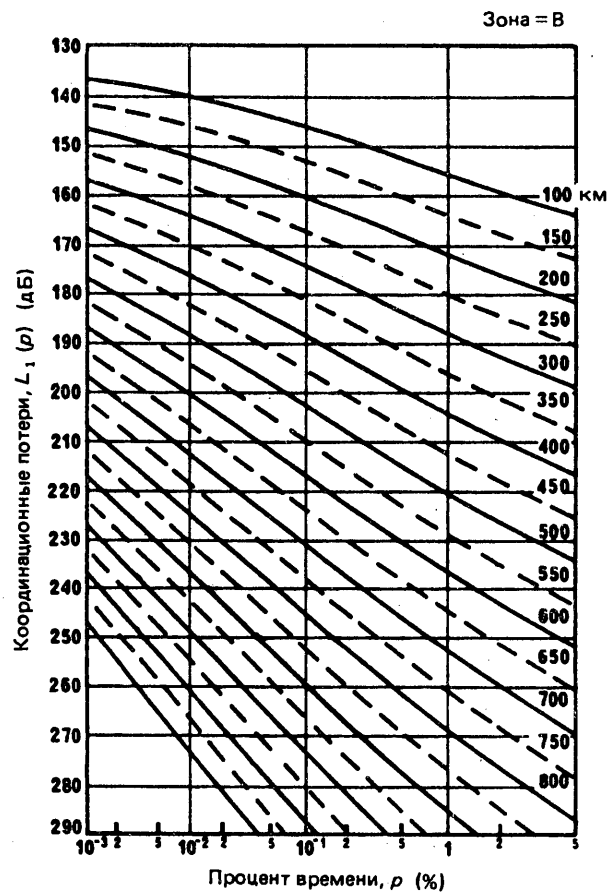
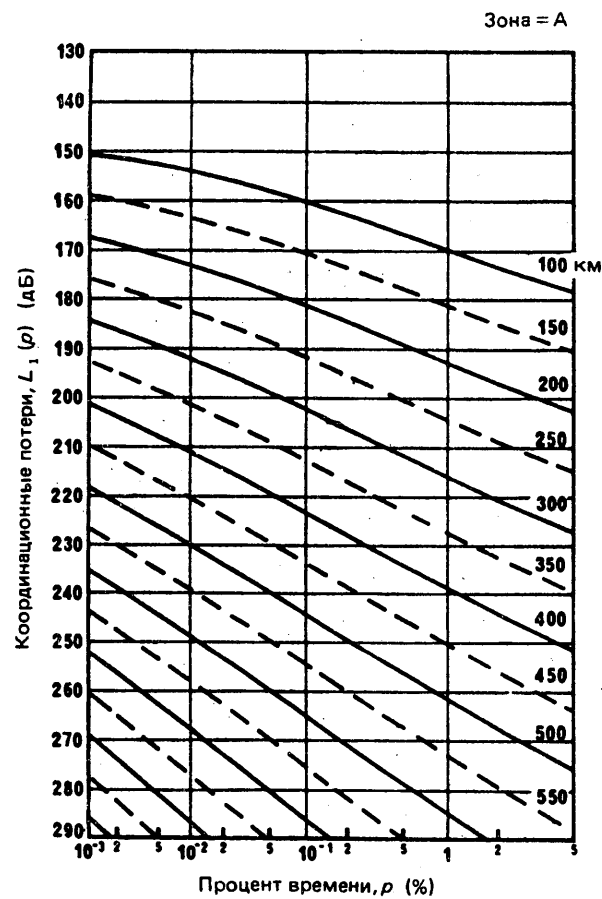


РИСУНОК 34 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 8,0 ГГц

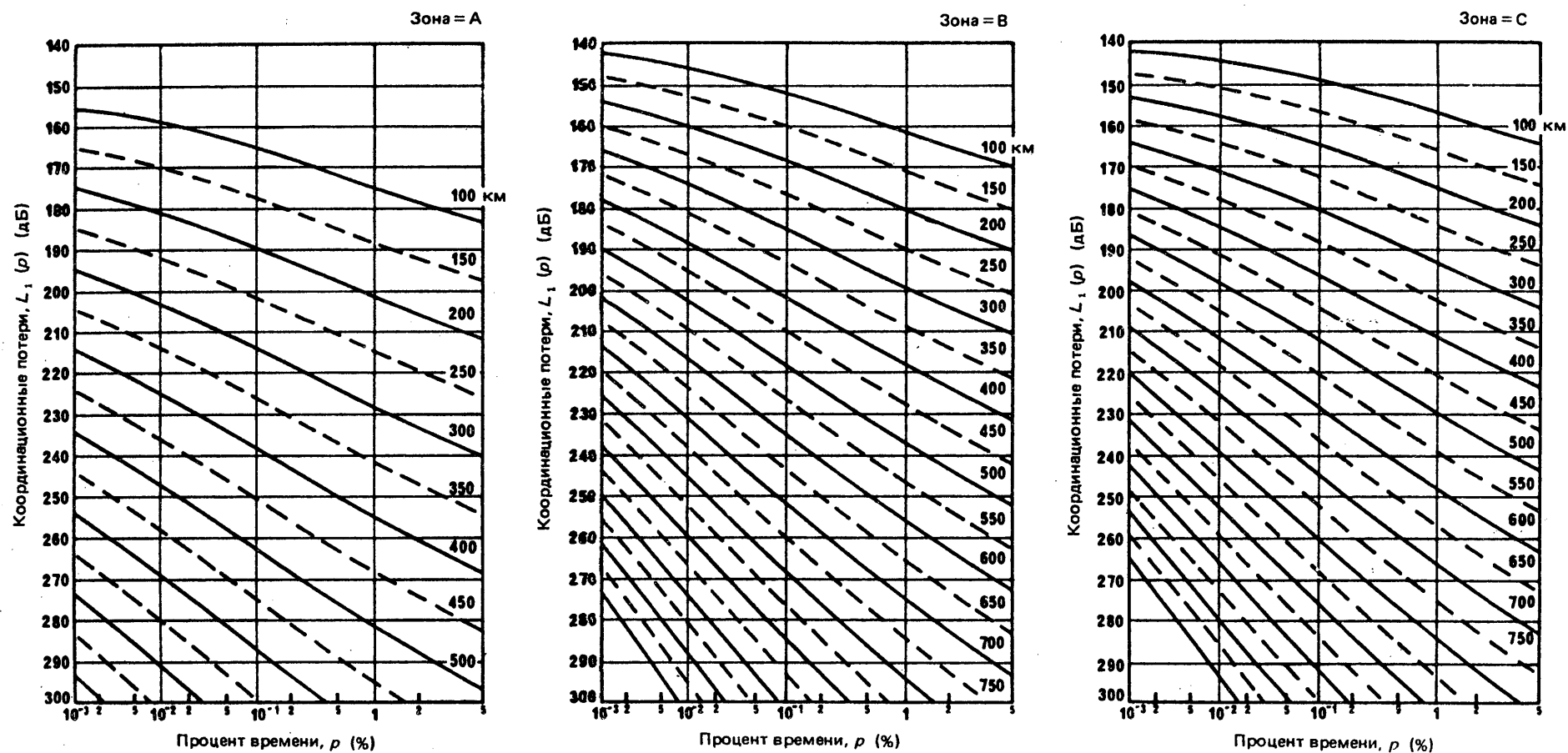


РИСУНОК 35 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 12,0 ГГц

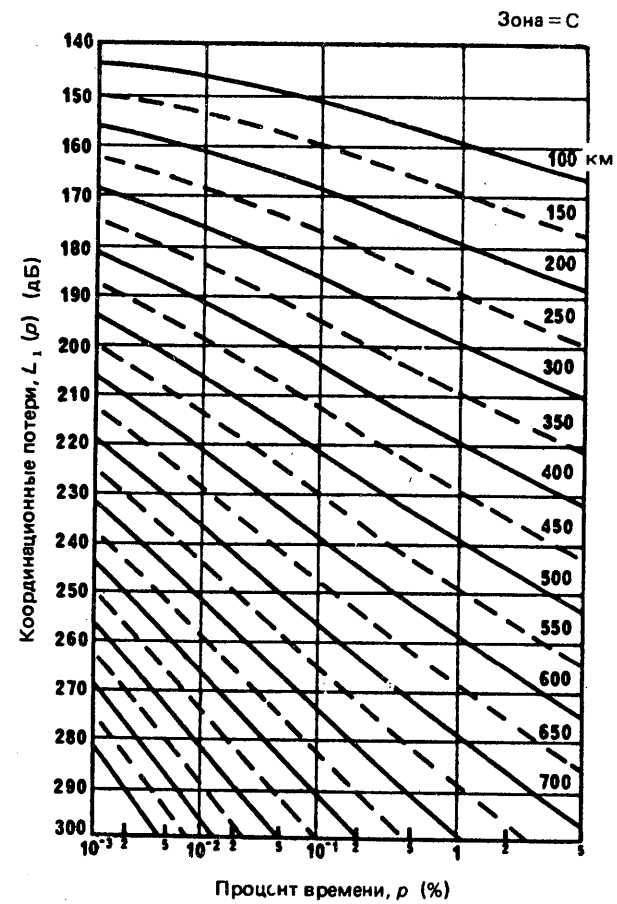
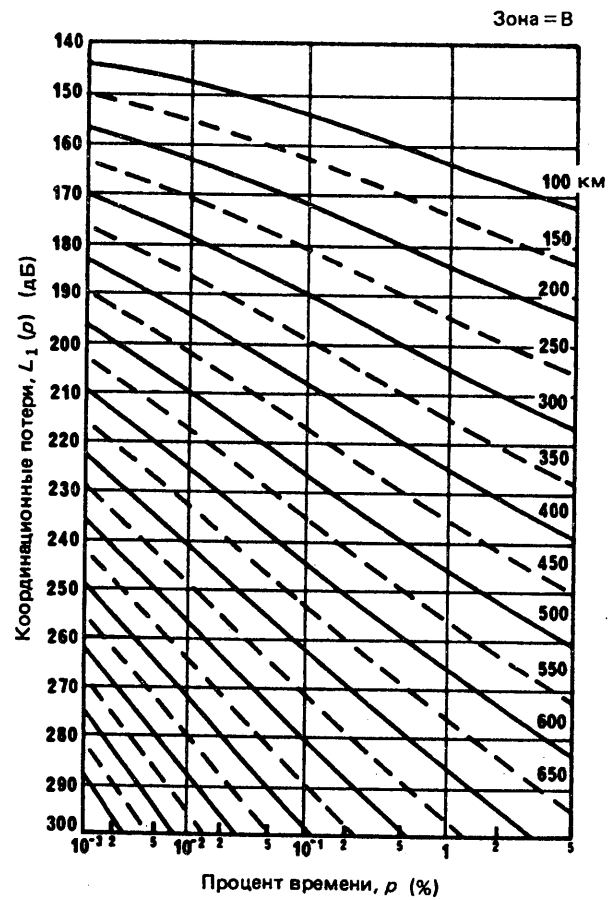
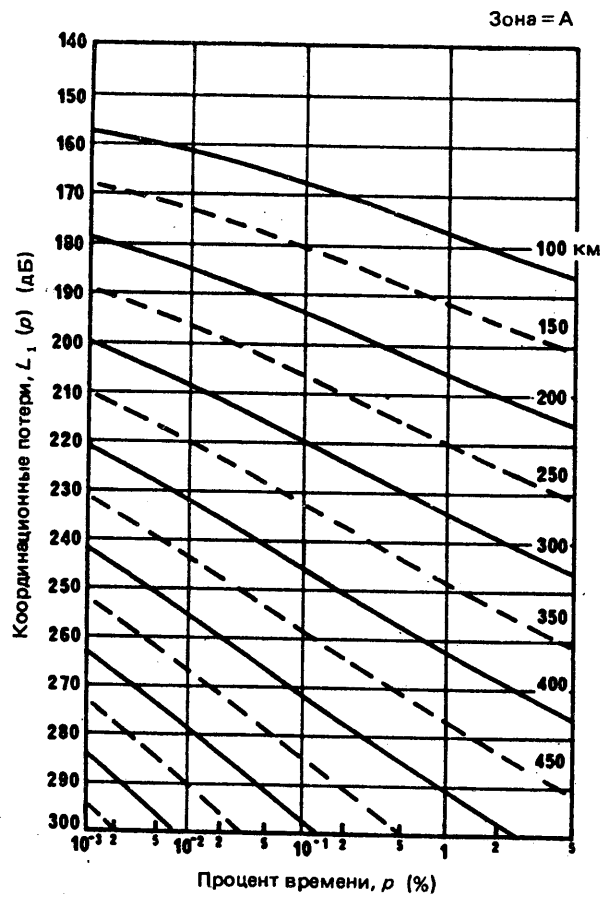


РИСУНОК 36 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 14,0 ГГц

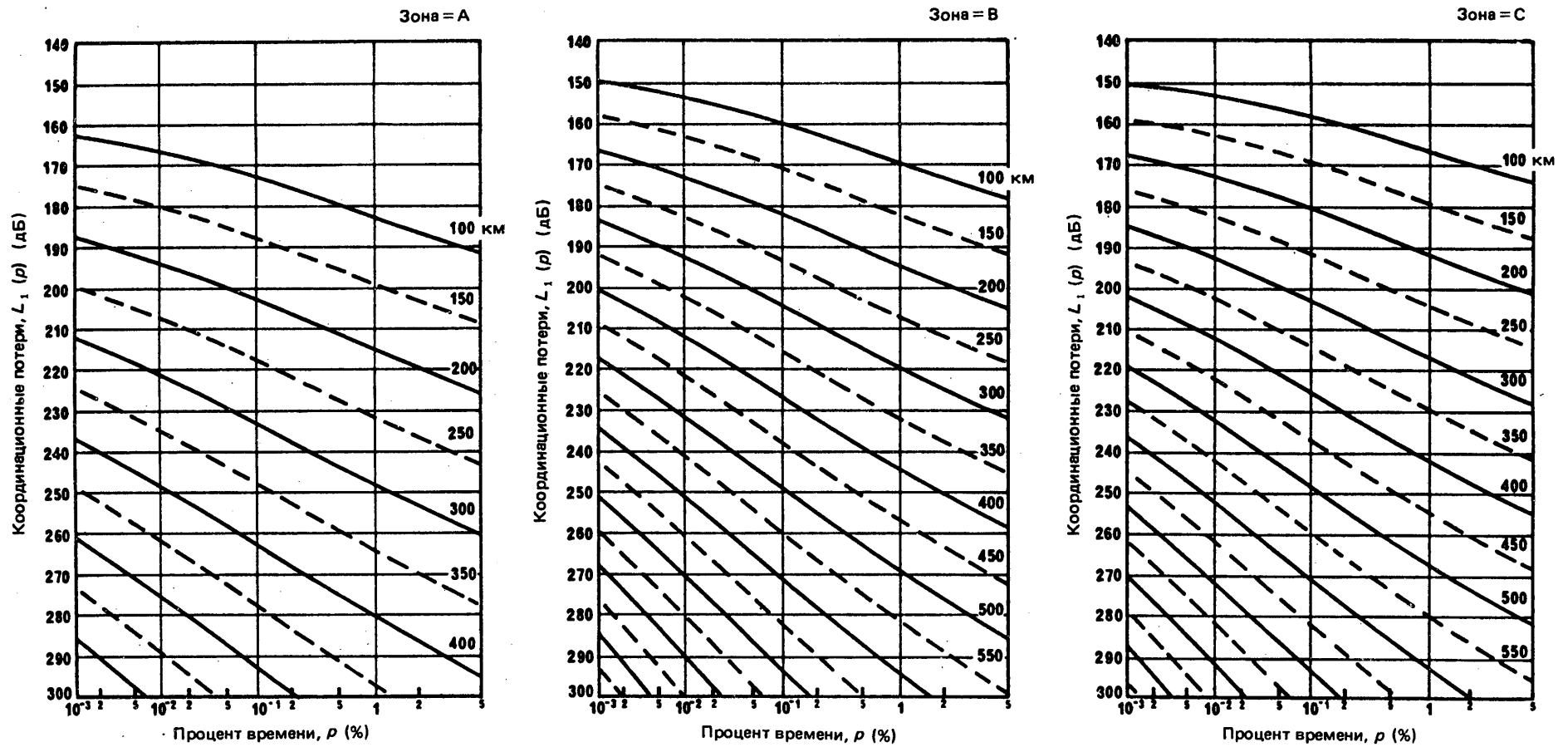


РИСУНОК 37 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 18,0 ГГц

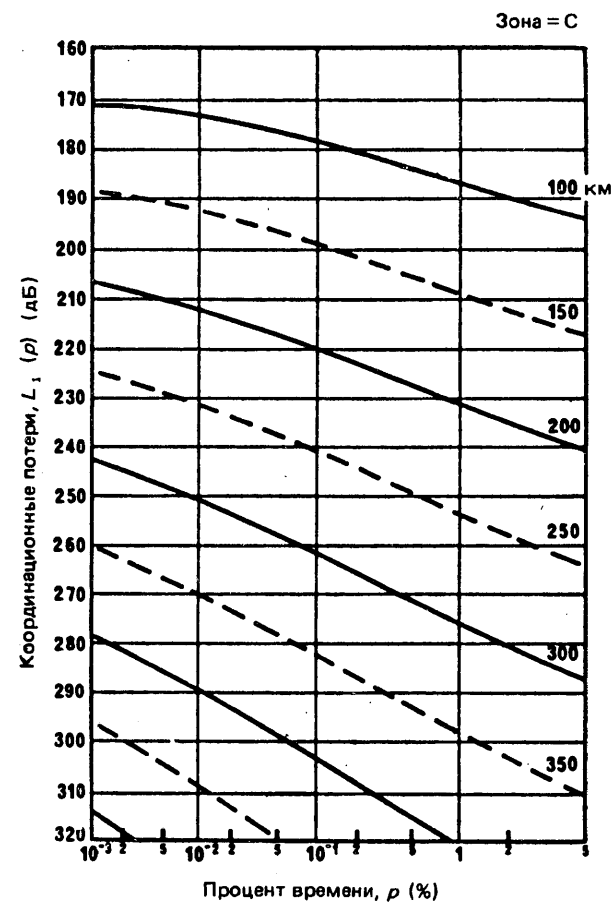
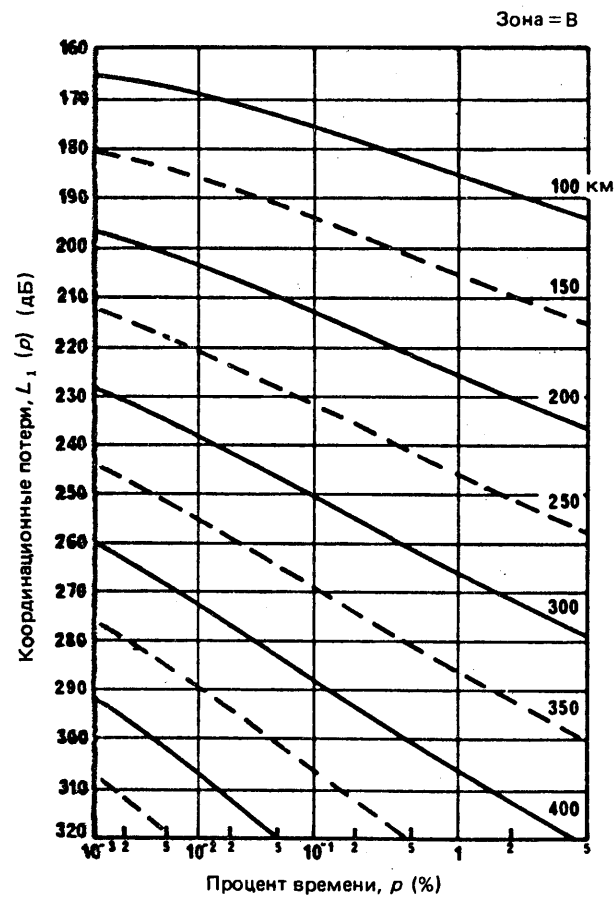
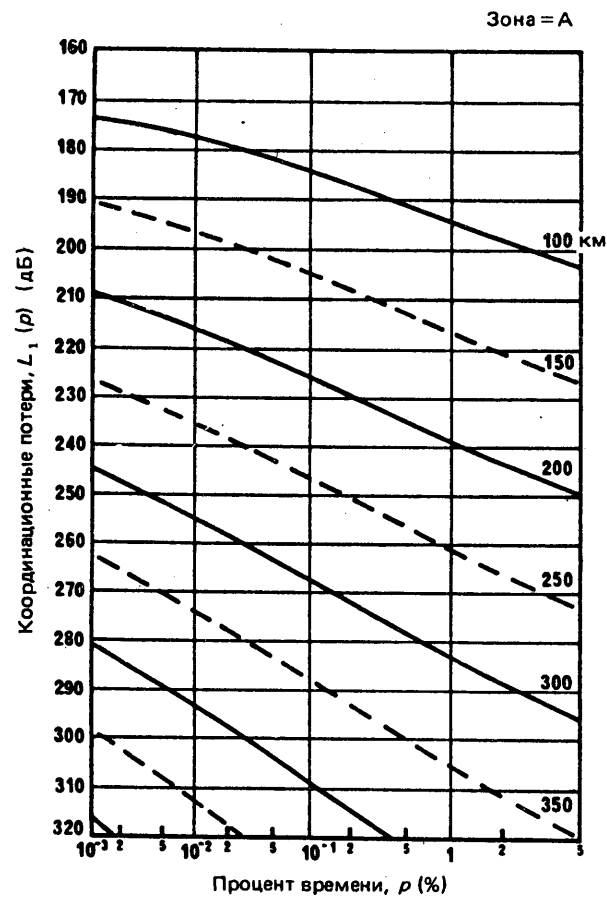


РИСУНОК 38 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 22,3 ГГц

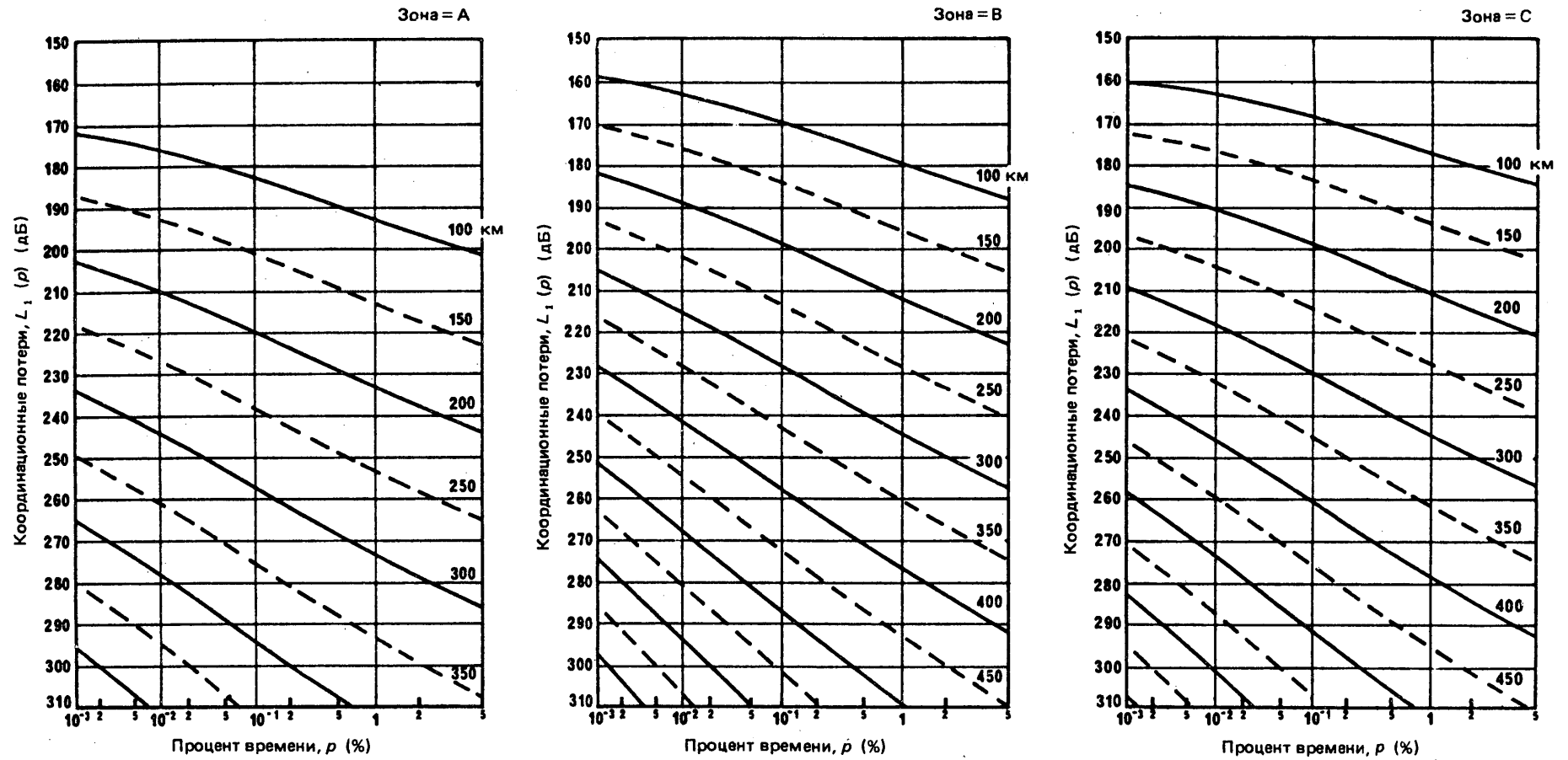


РИСУНОК 39 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 28,0 ГГц

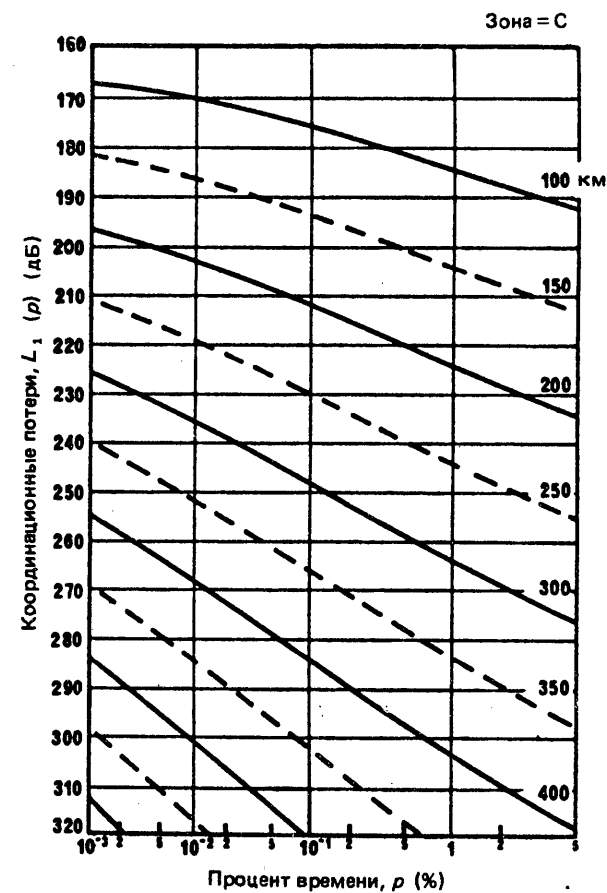
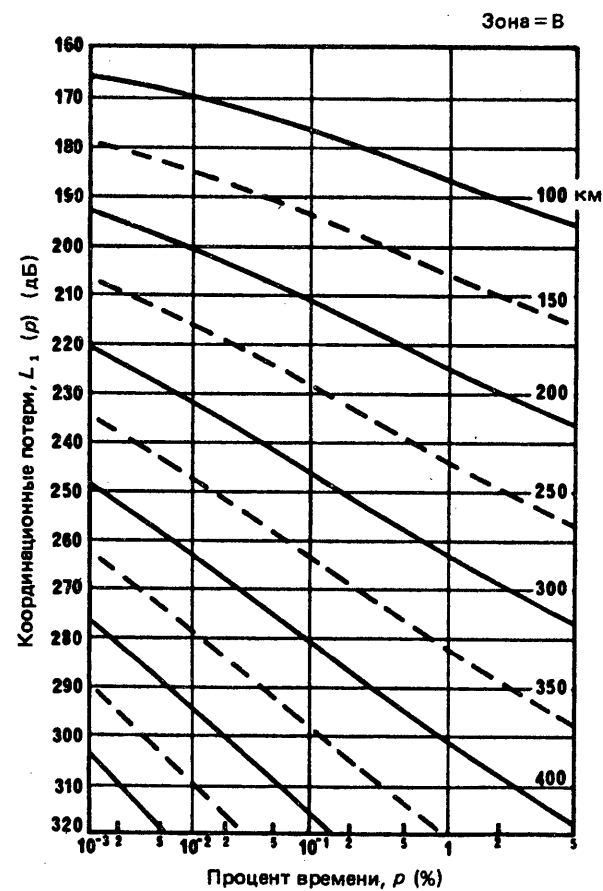
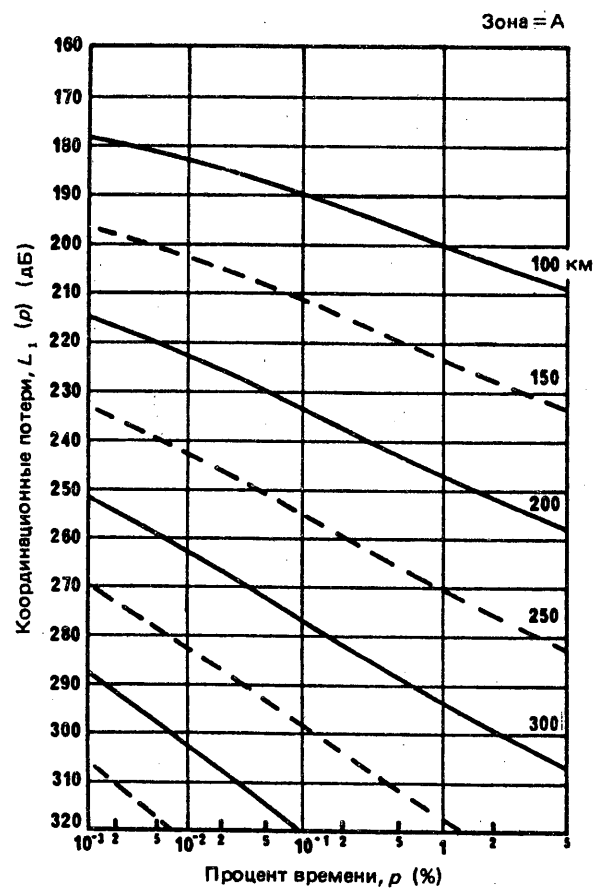


РИСУНОК 40 — Координационные потери $L_1(p)$, дБ, в зависимости от процента времени, p , для нескольких значений расстояния в км

Частота = 40,0 ГГц

ОТЧЕТ 448-5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПОМЕХ
МЕЖДУ ЗЕМНЫМИ И НАЗЕМНЫМИ СТАНЦИЯМИ

(Вопросы 32/4 и 17/9)

(1970—1974—1978—1982—1986—1990)

Предварительное замечание

Все более широкое внедрение цифровых спутниковых и радиорелейных систем связи диктует необходимость существенной переработки Отчета 448. В такую переработку было бы необходимо включить, среди прочего, пересмотр коэффициента J и «запаса по помехе» $M_0(p_0)$ при использовании цифровых систем, с учетом условий распространения по моде (1) до 20% времени, и возможности увеличения до 10 — в некоторых обстоятельствах — числа случаев непосредственного попадания помехи при прямой видимости.

1. Введение

Если координационная зона земной станции захватывает территорию любой другой администрации, требуется взаимная консультация между заинтересованными администрациями. Каждая земная станция, находящаяся внутри координационной зоны, должна быть проверена, с тем чтобы определить, будет ли она создавать или испытывать помехи, превышающие допустимое значение. Там, где результаты предварительного исследования указывают на возможные помеховые ситуации, или там, где становится ясно, что количество помех может превышать значения, приведенные в Отчете 382, вероятность помех между земной и наземной станциями должна оцениваться на основе детальных расчетов.

В данном Отчете описан метод оценки возможности превышения предварительно установленного допустимого уровня помех между земными станциями и определенными наземными станциями. Этот метод предназначен служить для администраций только руководством, так как метод определения возможностей помех является предметом соглашения между заинтересованными администрациями.

В приложении I к данному Отчету описывается также дополнительный подход к концепции вспомогательных контуров, представленный в Отчете 382.

2. Процедура предварительного исключения

Метод расчета координационного расстояния, описанный в Отчете 382, предполагает определенные эталонные величины для параметров наземных станций. Весьма большой процент действующих или планируемых наземных станций, остающихся внутри координационной зоны, может быть исключен из дальнейшего рассмотрения (с учетом их реальных или запланированных параметров) путем использования вспомогательных контуров, как определено в Приложении 28 Регламента радиосвязи (Женева, 1979).

Один ряд контуров связан с величинами показателя чувствительности наземной станции к помехам S в дБВт, который определяется как

$$S = G_r - P_r(p), \quad (1)$$

где

G_r : чистое усиление (то есть собственно усиление антенны минус потери в фидере в дБ относительно изотропной антенны; когда потери фидера не известны, их следует предполагать равными 0 дБ) приемной антенны наземной станции в направлении на земную станцию;

$P_r(p)$: допустимая мощность помехи (в дБВт) в эталонной полосе, которая будет превышать не более чем в p процентов времени на входе приемника станции, испытывающей помехи (в данном случае наземной станции).

Другой ряд контуров связан с величинами э.и.и.м. наземной станции:

$$E = P_t + G_t, \quad (2)$$

где

P_t : мощность передатчика в эталонной полосе В (в дБВт) на входе антенны мешающей станции (в данном случае — наземной станции);

G_t : усиление (в дБ относительно изотропной) передающей антенны наземной станции в направлении на земную станцию.

Каждая наземная станция, расположенная внутри координационной зоны, может быть проверена, с тем чтобы определить возможность ее исключения из дальнейшего рассмотрения:

- для наземных станций, которые могут принимать помехи от земной станции, следует определить показатель чувствительности к помехам в направлении на земную станцию. Если эта величина меньше, чем величина, связанная с ближайшим контуром, за которым эта станция располагается, то станция может быть исключена из рассмотрения. В противном случае должны быть выполнены детальные расчеты, указанные в § 3;
- для наземных станций, которые могут создавать помехи земной станции, следует определить реальную э.и.и.м. в направлении на земную станцию. Если эта величина меньше, чем величина, связанная с ближайшим контуром, за которым располагается наземная станция, то станция может быть исключена из рассмотрения. В противном случае должны быть выполнены детальные расчеты, указанные в § 3.

Вышеупомянутый метод основан на предположении:

- что кривые основных потерь передачи, на которых базируется Отчет 382, являются консервативными;
- что количество источников помех, предполагаемых в Отчете 382 при расчете вспомогательных контуров, не превышает.

Наземные станции, исключенные по вышеописанной процедуре из дальнейшего рассмотрения в соответствии с механизмами распространения по большому кругу, следует, тем не менее, рассматривать в дальнейшем при учете рассеяния в осадках, когда эти станции располагаются внутри координационной зоны с осадками.

Недавние исследования, приведенные в Отчете 1054, указывают на рассеяние от местности как на механизм помех, который должен рассматриваться при определенных обстоятельствах. Как это повлияет на координацию, покажут дальнейшие исследования.

3. Определение потенциала помех (механизм распространения по большому кругу) (см. Отчет 569)

Наземные станции, расположенные внутри координационной зоны, которые не могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения по методу, описанному в § 2, должны быть подвергнуты более детальному анализу.

Для каждой наземной станции необходимо сравнить имеющиеся основные потери на трассе и величину минимально допустимых основных потерь передачи, при которых помеха является незначительной для двух процентов времени: (1) равному 20% времени (p_1) и (2) малому проценту времени ($< 1\%$), обозначенному p_2 .

Можно предположить, что помехи являются незначительными, когда для обоих значений процентов времени имеющиеся основные потери передачи на трассе распространения превышают минимально допустимые основные потери передачи.

3.1 Уровень максимально допустимых помех

Уровень допустимой мощности помехи на входе приемника наземной или земной станции может в наиболее общей форме выражаться как мешающая радиочастотная мощность (P_r) от одного из n источников помех в эталонной полосе (B), которая будет превышать не более чем в определенном проценте времени (p_i). Для большинства практических целей два таких значения процента времени будут достаточны: один (p_1), выбранный для отражения нормальных (близких к медианным) условий, для которых можно предположить, что вклады помех от всех источников будут возникать одновременно и складываться по мощности:

$$P_r(p_1) = 10 \log(kT_r B) + J - 10 \log n_1 - W \quad \text{дБВт}, \quad (3)$$

и другой (p_2), выбранный для отражения существенно повышенных (малые проценты времени) помеховых условий, для которых можно предположить, что вклады помех от всех мешающих источников будут возникать не одновременно и складываться на процентно-временной основе:

$$P_r(p_2/n_2) = 10 \log(kT_r B) + J + M(p_2/n_2) - W \quad \text{дБВт}, \quad (4)$$

где

- p_1, p_2 : проценты времени, в течение которых помехи от всех источников могут превышать допустимый уровень; p_1 представляет долговременные ($p_1 \geq 1\%$), а p_2 — кратковременные условия ($p_2 \leq 1\%$);
- n_1 : эффективное количество ожидаемых одновременно вкладов помех равного уровня, связанных с величиной p_1 ;
- n_2 : эффективное количество неодновременно ожидаемых вкладов помех равного уровня и для равных процентов времени, связанных с величиной p_2 ;
- k : постоянная Больцмана, $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;
- T_r : шумовая температура приемной системы (при условии ясного неба для земной станции) (K);
- B : эталонная полоса (в Гц) (полоса, относящаяся к подверженной помехе системе, в которой мощность помехи может усредняться);
- J : отношение (в дБ) допустимой долговременной (20% времени) мощности мешающего сигнала к мощности теплового шума в приемной системе (см. примечание 2 в Отчете 382);
- $M(p_2/n_2)$: отношение (в дБ) между допустимыми мощностями помех в течение $(p_2/n_2)\%$ и 20% времени, соответственно, для всех источников помех (см. примечание 3 в Отчете 382);
- W : отношение (в дБ) приращения мощности теплового шума к мощности помехи на радиочастоте в эталонной полосе частот для эквивалентного ухудшения сигнала после детектирования (см. примечание 4 в Отчете 382).

Значения этих параметров в цифровом выражении представлены в таблице I.

ТАБЛИЦА I — Величины параметров, относящиеся к уравнениям (1) и (2)

Диапазон частот (ГГц)		1-10	1-10	1-10	10-15	10-15	10-15	15-40	15-40
Служба мешающей системы		Фиксированная спутниковая	Фиксированная спутниковая	Фиксированная подвижная	Фиксированная подвижная	Фиксированная спутниковая	Фиксированная спутниковая	Фиксированная подвижная	Фиксированная спутниковая
Полезная система	Служба	Фиксированная подвижная	Фиксированная подвижная	Фиксированная спутниковая	Фиксированная спутниковая	Фиксированная подвижная	Фиксированная подвижная	Фиксированная спутниковая	Фиксированная подвижная
	Тип станции	Радиорелейная	Тропосферная	Земная станция	Земная станция	Радиорелейная	Радиорелейная	Земная станция	Радиорелейная
	Модуляция	A	A	A	A	A	N	N	N
p_1 (%)		20	20	20	20	20	20	20	20
n_1		2	1	3	2	2	2	4	1
p_2 (%)		0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,003	0,003	0,003
n_2		2	1	3	2	2	1	1	1
B (Гц)		4×10^3	4×10^3	10^6	10^6	4×10^3	10^6	10^6	10^6
J (дБ)		16	9	—8	—8	16	0**	0	0**
M (p_2/n_2) (дБ)		17	17	17	17	17	30**	5*	30**
W (дБ)		0	0	4	4	0	0	0	0
T_r (К)		750	500	—	—	1500	1500	—	3200

* M (p_2/n_2) могут иметь значения между 5 и 40 дБ в зависимости от частоты, дождевого климата и проекта системы.

** Эти значения подходят для общего случая нескоррелированных замираний полезного и мешающего сигналов. Там, где эти замирания (из-за дождя) могут быть существенно коррелированы (то есть если помехи распространяются по той же трассе, что и полезный сигнал), то можно использовать значения для J и M (p_2/n_2), отличные от значений, приведенных в данной таблице.

3.2 Минимально допустимые основные потери передачи

Минимально допустимые основные потери передачи для 20% времени определяются выражением

$$L_b(20) = P_{f'} + G_{f'} + G_r - P_r(20). \quad (5)$$

Минимально допустимые основные потери передачи для $p\%$ времени определяются выражением

$$L_b(p) = P_{f'} + G_{f'} + G_r - P_r(p), \quad (6)$$

где $p = p_2/n_2$ (из таблицы I), $P_{f'}$ и $G_{f'}$ — соответствующие параметры мешающей станции на трассе с минимальными потерями передачи, а G_r , $P_r(p)$ и $P_r(20)$ — соответствующие параметры станции, испытывающей помехи на трассе с минимальными потерями передачи.

3.3 Имеющиеся основные потери передачи

Могут использоваться процедуры расчета, изложенные в Отчете 569, или любые другие процедуры, приемлемые для заинтересованных администраций.

Однако, когда рассматриваемая наземная станция находится в 25—100 км от земной станции, может быть применен быстрый метод, в котором используются кривые, показанные на рис. 1 и 2, полученные из рис. 10-1-18 и 10-1-19 в приложении к главе 10 Отчета SJM (Специальное объединенное собрание МККР, 1971 г.). Эти кривые показывают величины $L_0(0,01)$ и $L_0(20)$ имеющихся основных потерь передачи для 0,01% и 20% времени, нормализованные для 4 ГГц. Они применимы независимо от вида трассы помех (то есть как для сухопутной, так и для морской трассы). Величины имеющихся основных потерь передачи, $L_{b1}(p)\%$ и $L_{b1}(20\%)$ для $p\%$ и 20% времени, на любой частоте выводятся из выражений:

$$\begin{aligned} L_{b1}(p) &= L_0(0,01) + F(p) + 20 \log(f/4); \\ L_{b1}(20) &= L_0(20) + 20 \log(f/4), \end{aligned} \quad (7)$$

где $F(p)$ показана на рис. 1.

Если одна из величин, полученных таким образом, не превышает соответствующих минимально допустимых основных потерь передачи, то должен использоваться более точный метод, указанный в начале этого раздела.

4. Определение потенциала помех (рассеяние в осадках)

В случаях, когда помехи могут вызываться рассеянием в осадках, минимально допустимые потери передачи

$$L(p) = P_{f'} - P_r(p) \quad (8)$$

могут рассчитываться и сравниваться с потерями, вызванными рассеянием в осадках. Если первая величина меньше, чем вторая, то можно сказать, что помеха, вызванная рассеянием в осадках, является незначительной

Метод расчета имеющихся потерь передачи между земной и наземной станциями, когда механизмом распространения является рассеяние из-за осадков, дан в Отчете 569.

5. Замирания

Оценивая вероятность помех между земными и наземными станциями, следует учитывать возможность замирания полезного сигнала при не меняющемся мешающем сигнале.

Требуются дальнейшие исследования для того, чтобы полностью оценить вероятность помехи в общем случае, когда как полезный, так и мешающий сигналы изменяются с учетом статистической корреляции.

Исследование, проведенное в Соединенном Королевстве, показало, что может быть некоторая корреляция между случаями многолучевого замирания полезного сигнала и случаями увеличения мешающего сигнала из-за образования атмосферных волноводов. Этот вопрос рассматривается в Отчете 569.

6. Заключение

В заключение можно сказать, что помехи, возникающие между земной и наземной станциями, бывают незначительными, если уровень мощности помехи для механизма распространения по большому кругу не превышает максимально допустимый уровень помехи для 20% времени, а также если уровень мощности помехи для всей совокупности механизмов распространения (то есть механизмов распространения по большому кругу и из-за рассеяния в осадках) не превышает максимально допустимый уровень помех для малого согласованного процента времени.

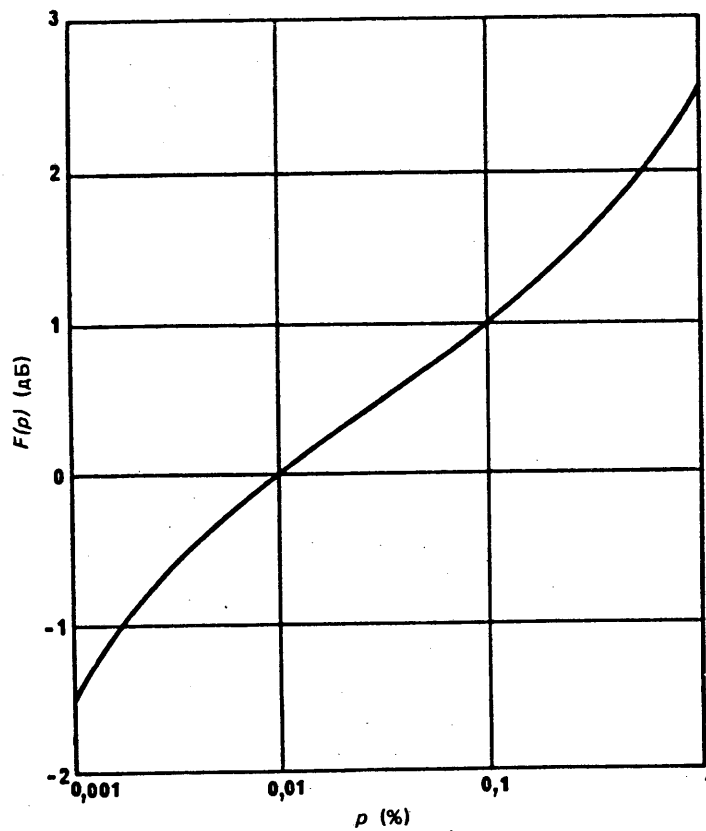


РИСУНОК 1 — Коэффициент коррекции процента времени $F(p)$

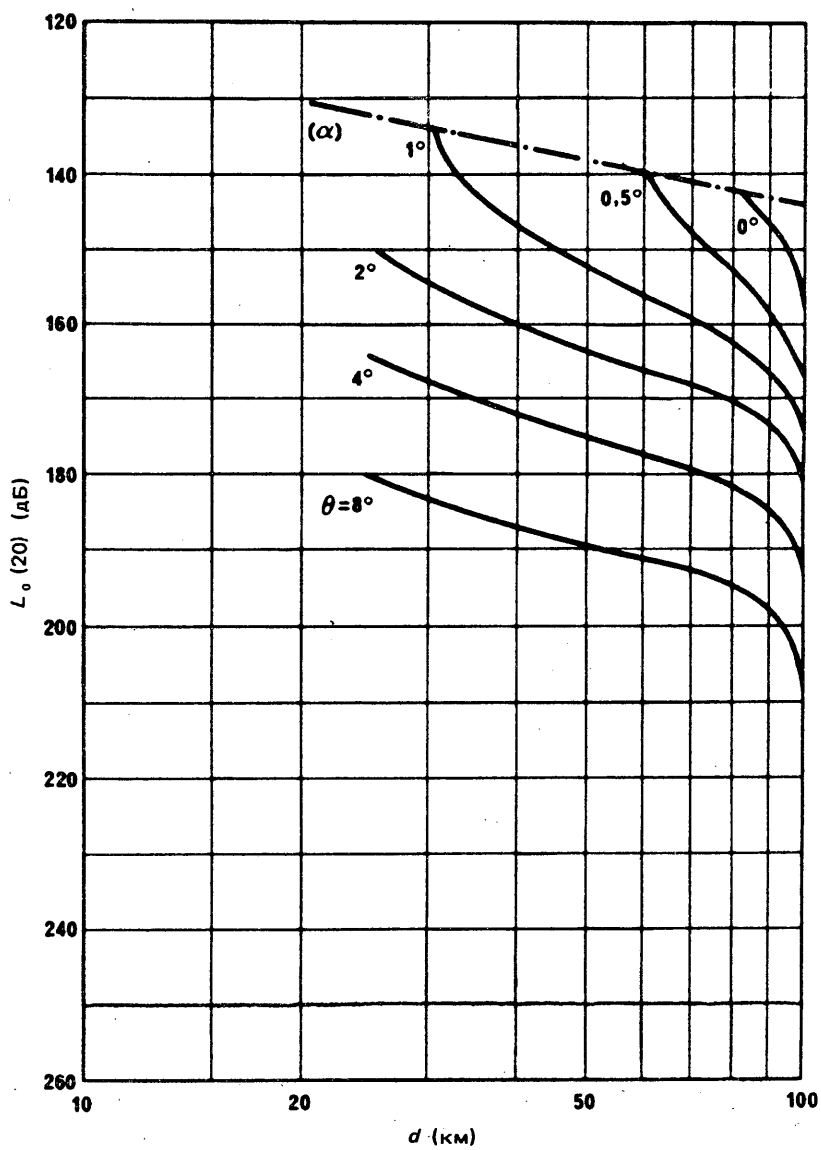


РИСУНОК 2а — 20% времени

(a): свободное пространство

d : расстояние (км) от земной станции до наземной станции

$L_0(20)$: основные потери передачи на трассе (дБ), нормализованные для 20% времени и для 4 ГГц

θ : угол места физического горизонта над горизонтальной плоскостью от земной станции в направлении к наземной станции

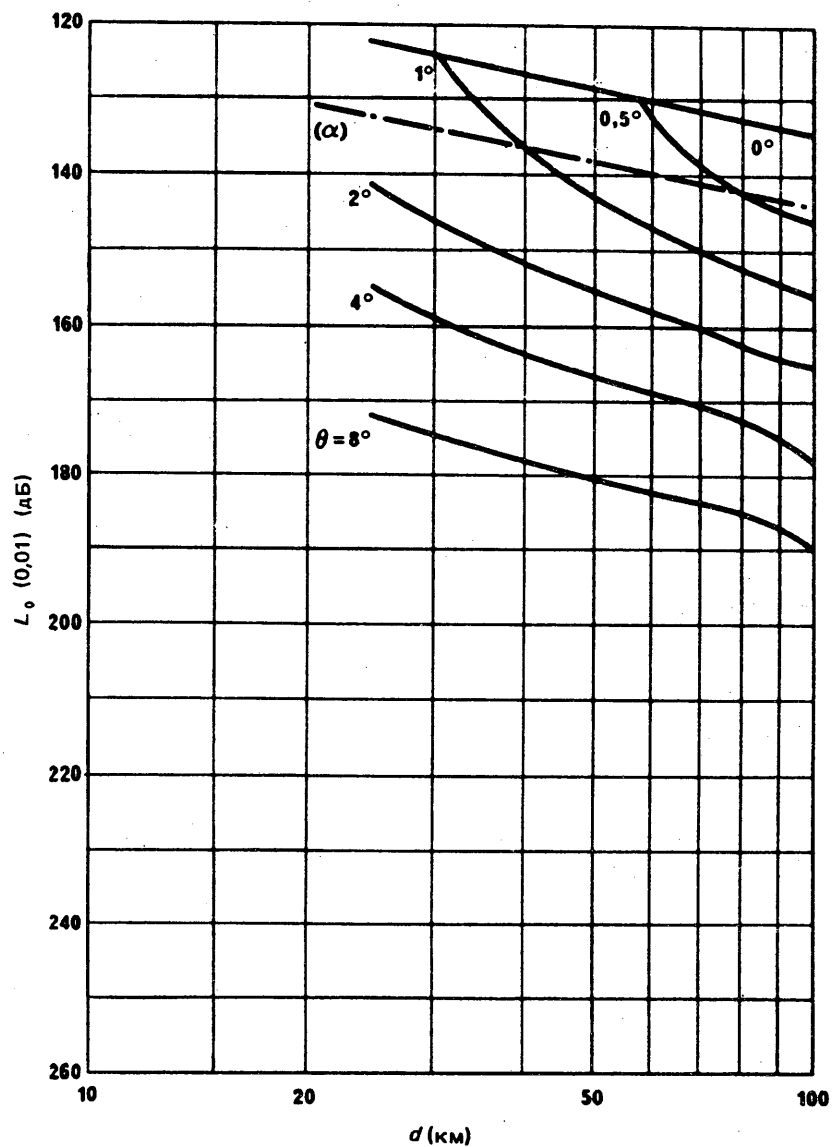


РИСУНОК 2b — 0,01% времени

- (α) : свободное пространство
 d : расстояние (км) от земной станции до наземной станции
 $L_0(0,01)$: основные потери передачи на трассе (дБ), нормализованные для 0,01% времени и для 4 ГГц
 θ : угол места физического горизонта над горизонтальной плоскостью от земной станции в направлении к наземной станции

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ КОНТУРЫ, СВЯЗАННЫЕ С УГЛОМ,
КОТОРОГО НЕОБХОДИМО ИЗБЕГАТЬ

Для беглого первого приближения, в частности, когда наземные станции какой-либо зоны нанесены на карту этой зоны, представляется целесообразным использовать контуры углов, которых следует избегать.

При согласии заинтересованных администраций этот метод мог бы применяться как дополнительная процедура к процедуре, указанной в Отчете 382. Однако поскольку этот метод предполагает, что все наземные станции внутри координационной зоны имеют одинаковые диаграммы излучения и одинаковую мощность, равную ее максимальному допустимому значению, то ряд наземных станций, которые будут исключаться по основному методу, описанному в пункте 2 данного Отчета, не будет исключаться при использовании концепции угла, которого необходимо избегать.

На основе эталонной диаграммы направленности для антенн наземных станций, например, такой, как та, что указана в уравнении (3) Отчета 614, можно определить набор вспомогательных контуров как функцию угла, которого необходимо избегать. Этот угол определяется как азимутальный угол φ между осью основного луча антенны наземной станции и направлением к земной станции. Эти вспомогательные контуры для видов распространения (1) и (2) позволяют исключить из дальнейшего рассмотрения все наземные станции, имеющие углы отклонения $\geq \varphi$ и расположенные вне вспомогательных контуров, обозначенных φ .

Одни и те же вспомогательные контуры для вида распространения (1), начерченные для уменьшенной чувствительности S или э. и. и. м., могут также обозначаться с соответствующим углом, которого необходимо избегать. Угол, соответствующий определенному контуру S или э. и. и. м., рассчитывается из соответствующей эталонной диаграммы направленности с учетом разницы между максимальным коэффициентом усиления и усилением в направлении угла φ относительно основного направления.

Вспомогательные контуры для вида распространения (2) с углом, которого необходимо избегать в качестве параметра, могут определяться с помощью итеративного процесса, описанного в [МККР, 1978-82].

На рис. 3 изображены вспомогательные контуры для видов распространения (1) и (2) для приемной земной станции.

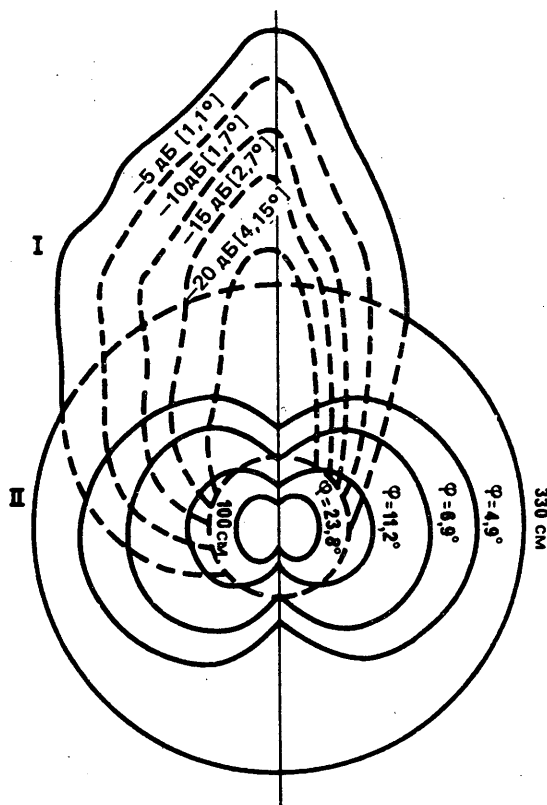


РИСУНОК 3 — Пример вспомогательных контуров, связанных с углом, которого необходимо избегать φ , для вида распространения (I) (---) и для вида распространения (2) (—)

ССЫЛКИ

Документы МККР

[1978-82]: 4/130(9/101) (Социалистическая Федеративная Республика Югославия).

ОТЧЕТ 388-6

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА
И ГОТОВНОСТЬ НАЗЕМНЫХ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМ
И СИСТЕМ ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ**

(Вопросы 32/4 и 23/9, Исследовательская программа 23А/9)

(1966—1970—1974—1978—1982—1986—1990)

1. Введение

Целью настоящего Отчета является определение влияния помех на характеристики качества и готовность наземных радиорелейных систем и систем фиксированной спутниковой службы с учетом различных методов аналоговой и цифровой модуляции, используемых в системах, на которые воздействуют помехи, и в мешающих системах.

Для большинства случаев представлены формулы и/или графики, по которым может быть легко определено ухудшение вследствие воздействия помех. Также приведены спектры сигналов, позволяющие определить помехи из общих представлений и помогающие в расчетах плотности мощности, используемых в Отчете 792 и Рекомендации 675. Включено много комбинаций полезного и мешающего сигналов, соответствующих следующим видам модуляции и передачи:

- телефонная связь с частотным разделением каналов и частотной модуляцией (ЧРК-ЧМ);
- ЧМ телефонная связь с одним каналом на несущей (ОКН);
- ЧМ телевизионная передача;
- телефонная связь с амплитудной модуляцией (АМ);
- передача цифровых сигналов.

Необходимо дальнейшее изучение сигналов аналоговой телефонной связи с одной боковой полосой (ОБП), компандированных сигналов ОБП, компандированных сигналов с ЧРК-ЧМ, смешанной передачи цифровых сигналов и сигналов телефонии (DAV) или телевидения (DAVID), уплотненного аналогового компонентного телевизионного сигнала MAC-TV, ТВ высокой четкости (ТВВЧ), сигналов систем многостанционного доступа с временным разделением (МДВР), сигналов систем многостанционного доступа с кодовым разделением каналов и рассеянным спектром и т. д.

Ухудшение характеристик передачи сигналов аналоговой телефонии может быть выражено в показателях шума (в пВт) и неготовности. В случае передачи цифровых сигналов оно может быть выражено в показателях: коэффициент ошибок по битам (BER), пораженные секунды, секунды с ошибками, минуты пониженного качества

и коэффициент неготовности. В случае ЧМ телевизионной передачи приведенные выражения дают возможность оценить допустимое отношение сигнала к помехе.

Включены замечания, указывающие на необходимость учитывать влияние помех, которое не предопределяется расчетами, основанными на спектрах сигналов, а также влияние нелинейных каналов.

В заключение приводится большой список литературы, в которой более глубоко рассматривается этот сложный вопрос, связанный с помехами, и на основе которой составлен текст данного Отчета.

2. Представления помех

2.1 Полезный сигнал аналоговой ЧРК-ЧМ телефонной связи

2.1.1 Общее представление

Зависимость (эта линейная зависимость действительна только для низких уровней помех, воздействующих на сигналы ЧРК-ЧМ телефонной связи) мощности помех основной полосы в телефонном канале от отношения сигнала к помехе включает коэффициент ослабления помех B (в дБ), который определяется следующим образом:

$$B = 10 \log \frac{S/N_i}{C/I}, \quad (1)$$

где

S : мощность испытательного сигнала в телефонном канале = 1 мВт;

N_i : невзвешенная мощность помехи в телефонном канале (ширина полосы — 3,1 кГц);

C : мощность полезного сигнала (Вт);

I : мощность мешающего сигнала (Вт).

Взвешенная мощность помехи N_p (в пВт) берется как невзвешенная мощность в полосе 1,75 кГц, что дает:

$$10 \log N_p = 87,5 - B - 10 \log (C/I). \quad (2)$$

Коэффициент ослабления помех B выражается формулой [Medhurst, 1962; Pontano и др., 1973]:

$$B = 10 \log \frac{2 (\delta f)^2 P (f/f_m)}{b f^2 D (f, f_0)} \quad (3)$$

при

$$D (f, F_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S (F) P_1 (f + f_0 - F) dF + \int_{-\infty}^{+\infty} S (F) P_1 (f - f_0 - F) dF + S (f + f_0) P_{10} + S (f - f_0) P_{10} + S_0 P_1 (f + f_0) + S_0 P_1 (f - f_0) + \frac{S_0 P_{10}}{b} \delta (f - f_0); \quad (4)$$

$$P_1 (f) = P (f) A^2 (f); \quad (5)$$

$$P_{10} = P_0 A^2 (0); \quad (6)$$

$$\delta (f - f_0) = 1, \quad \text{если} \quad f = f_0; \quad (6a)$$

$$\delta (f - f_0) = 0, \quad \text{если} \quad f \neq f_0,$$

где

- δf : среднеквадратичное значение девиации частоты полезного сигнала, вызванное испытательным тоном (без предсказания) (кГц);
- f : центральная частота рассматриваемого канала в пределах основной полосы полезного сигнала (кГц);
- f_m : верхняя частота основной полосы полезного сигнала (кГц);
- $p(f/f_m)$: коэффициент предсказания для центральной частоты рассматриваемого канала в пределах основной полосы полезного сигнала;
- b : ширина полосы телефонного канала (3,1 кГц);
- f_0 : разность между несущими частотами полезного и мешающего сигналов (кГц);
- $S(f)$: непрерывная часть нормализованной спектральной плотности мощности полезного сигнала с предсказанием ($\Gamma\text{ц}^{-1}$);
- S_0 : нормализованная мощность остатка несущей полезного сигнала;
- $P(f)$: непрерывная часть нормализованной спектральной плотности мощности мешающего сигнала ($\Gamma\text{ц}^{-1}$);
- P_0 : нормализованная мощность остатка несущей мешающего сигнала;
- $A(f)$: амплитудно-частотная характеристика фильтра, принимающего полезный сигнал; началом отсчета частот служит центральная частота мешающего сигнала.

Спектральные плотности мощности нормализуются до единицы и считаются односторонними (только положительные частоты).

Выражение N_p через отношение C/I выведено из формул (2) и (3). Чтобы рассчитать N_p , необходимо определить:

- спектр полезного сигнала (аналоговая телефонная связь);
- спектр мешающего сигнала.

Выражения этих спектров приведены в § 3, ниже.

2.1.2 Помехи между сигналами ЧРК-ЧМ

2.1.2.1 Общее представление

При использовании выражений спектров, приведенных в § 3.1, ниже, см. § 2.1.1. Интеграл свертки можно с большой точностью вычислять по приближенным формулам, приведенным в [Бородич, 1983], если в пределах, определяемых уровнем спектральной плотности мощности одного из взаимодействующих радиосигналов, равным -25 дБ и -30 дБ, спектральная плотность мощности другого радиосигнала уменьшается относительно максимальной не более чем на 3–5 дБ.

2.1.2.2 Помехи от сигнала ЧРК-ЧМ с малым индексом модуляции сигналу ЧРК-ЧМ с большим индексом модуляции

Этот случай представляет ситуацию, когда наземная радиорелейная система создает помехи системе фиксированной спутниковой службы. Канал в основной полосе частот, в котором создается наибольшая помеха, определить трудно. Однако наихудшие условия воздействия помех возникают, когда разнос несущих частот полезного и мешающего сигналов равняется верхней частоте основной полосы полезного сигнала или меньше этой частоты.

Коэффициент B можно определить с помощью следующей формулы:

$$B = 10 \log \frac{1}{bf^2} \left\{ \frac{2 (\delta f)^2 p(f/f_m)}{S(f_0 - f) + S(f_0 + f)} \right\}. \quad (7)$$

Если индекс модуляции полезного сигнала больше 3, то форма спектра сигнала приближается к гауссовой, а формула (7) принимает следующий вид [Medhurst и Roberts, 1964; Johns, 1966a и b]:

$$B = 10 \log \frac{1}{bf^2} \left\{ \frac{2 \sqrt{2} \pi (\delta f)^2 p(f/f_m) f_s}{\exp \left[\frac{-(f_0 - f)^2}{2 f_s^2} \right] + \exp \left[\frac{-(f_0 + f)^2}{2 f_s^2} \right]} \right\}. \quad (7a)$$

Определения параметров в формулах (7) и (7a) были даны в § 2.1.1, за исключением следующих:

- f_s : среднеквадратичное значение девиации частоты полезного сигнала, создаваемое многоканальным сигналом (кГц),

$$= \delta f \cdot 10^{\mu} \cdot (LF)^{1/2}; \quad (8)$$

LF : коэффициент нагрузки, значение которого меньше единицы не в час наибольшей нагрузки;

$$\begin{aligned} y &= (-15 + 10 \log N_c)/20 && \text{при } N_c \geq 240, \\ &= (-1 + 4 \log N_c)/20 && \text{при } 60 \leq N_c < 240, \\ &= (2,6 + 2 \log N_c)/20 && \text{при } 12 \leq N_c < 60; \end{aligned} \quad (9)$$

N_c : число разговорных каналов в основной полосе.

Измеренные значения хорошо согласуются с расчетными значениями коэффициента B [МККР, 1966-69].

2.1.2.3 Помехи от сигнала ЧРК-ЧМ с большим индексом модуляции сигналу ЧРК-ЧМ с большим индексом модуляции

Этот случай является типичным для помех между системами фиксированной спутниковой службы. Однако модуляция с большим индексом может применяться и в наземных радиорелейных системах, особенно в полосах выше 10 ГГц, в которых ЧРК-ЧМ модуляция с большим индексом обеспечивает лучшее отношение сигнала к шуму и большую помехоустойчивость.

Сохраняют свое значение те же замечания, что и в § 2.1.2.2, касающиеся канала в основной полосе, в котором создается наибольшая помеха, и наихудшего разнеса частот. Кроме того, коэффициент B определяется по той же формуле (7), которая приведена в § 2.1.2.2, но с заменой f_s на F_s .

F_s определяется следующим образом:

$$F_s = \sqrt{f_{s1}^2 + f_{s2}^2}, \quad (10)$$

где f_{s1} и f_{s2} — среднеквадратичные значения девиации частоты полезного и мешающего сигналов, вызванные многоканальными сигналами (кГц).

2.1.2.4 Помехи между сигналами ЧРК-ЧМ со средним индексом модуляции

Чтобы вычислить помехи между конкретными сигналами с малыми индексами модуляции при данном разнесе несущих частот, необходимо прежде всего рассчитать свертку спектров этих сигналов, используя формулу (4), а затем применить формулы (3) и (2) для определения помех в телефонных каналах.

В разделе 3 приводятся графики нормализованных спектров сигналов ЧРК-ЧМ для типичных радиорелейных систем и систем спутниковой связи. Эти графики можно использовать для расчета свертки.

На рис. 1 изображен ряд кривых нормализованных спектров в зависимости от индекса модуляции для данных нормализованных значений частоты. Эти кривые могут легко использоваться для построения графика спектра любого индекса модуляции от 0,1 до 3. Если $m > 3$, то форма спектра сигнала приближается к гауссовой. Если индексы модуляции полезного и мешающего сигналов больше 3, то для расчета помех следует применять формулу (7) с учетом § 2.1.2.3.

В некоторых конкретных случаях, когда мешающий сигнал может быть охарактеризован среднеквадратичным индексом модуляции и верхняя частота его основной полосы равняется верхней частоте основной полосы полезного сигнала (то есть $f_{m1} = f_{m2} = f_m$), рассчитать функцию помехи $D(f, f_0)$ можно достаточно легко на основе нормализованных кривых рис. 1.

Эквивалентный индекс модуляции определяется с помощью формулы:

$$m = [m_1^2 + m_2^2]^{1/2}, \quad (11)$$

и для этого значения m на кривых, изображенных на рис. 1, мы находим значения $f_m S(f_1)$ и $f_m S(f_2)$,

где

$$f_1 = \frac{(f_0 + f)}{f_{m1}} \quad \text{и} \quad f_2 = \frac{(f_0 - f)}{f_{m1}}, \quad (12)$$

и далее:

$$D(f, f_0) = \frac{1}{f_{m1}} [f_m S(f_1) + f_m S(f_2)]. \quad (13)$$

Этот же метод можно использовать для приблизительного определения $D(f, f_0)$ в соответствии со значением «эквивалентного» индекса модуляции:

$$m = \left[m_1^2 + m_2^2 \left(\frac{f_{m2}}{f_{m1}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где

$$f_{m2} < f_{m1} \text{ и } m_2^2 \left(\frac{f_{m2}}{f_{m1}} \right)^2 \ll m_1^2. \quad (15)$$

Использованные символы обозначают:

f_0 : разнос несущих частот;

f_{m1}, f_{m2} : средние частоты верхнего канала основной полосы частот полезного и мешающего сигналов, соответственно;

m_1, m_2 : среднеквадратичные индексы модуляции полезного и мешающего сигналов, соответственно.

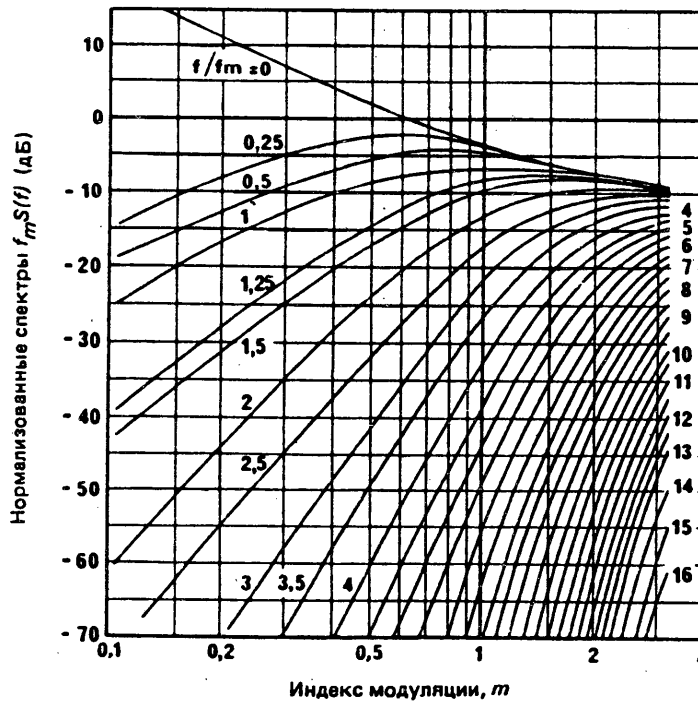


РИСУНОК 1 — Нормализованная спектральная плотность сигналов ЧРК-ЧМ

2.1.2.5 Помехи от сигнала ЧРК-ЧМ с большим индексом модуляции сигналу ЧРК-ЧМ с малым индексом модуляции

Этот случай типичен для ситуации, когда система фиксированной спутниковой службы создает помехи наземной радиорелейной системе. Угловая модуляция с малым индексом может рассматриваться как квазилинейная по отношению к некоторым видам мешающего сигнала; расчеты помех в этих случаях осуществляются простым способом, подобным тому, который используется для линейной двухполосной АМ.

Можно использовать следующую приближенную формулу:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Мощность помех в} \\ \text{телефонном канале} \\ \text{Мощность теплового} \\ \text{шума в телефонном} \\ \text{канале} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Мощность мешающего сигнала в двух} \\ \text{соответствующих полосах шириной} \\ \text{4 кГц на входе приемника} \\ \text{Мощность теплового шума в тех же} \\ \text{двух полосах шириной 4 кГц на входе} \\ \text{приемника} \end{array} \right\}$$

2.1.3 Помехи от цифровых сигналов с угловой модуляцией сигналам ЧРК-ЧМ

Цифровые системы, использующие модуляцию ФМ или ЧМ, представляют собой классы систем с угловой модуляцией. Следовательно, помехи от этих систем аналоговым системам с угловой модуляцией вычисляются с помощью интеграла свертки. Однако спектральные плотности цифровых сигналов с угловой модуляцией трудно поддаются обобщению; тем не менее в § 3.3 представлен спектр конкретного сигнала. Более обобщенные вычисления потребовали бы расчетов спектральной плотности цифрового сигнала (см. § 3.3), расчетов спектральной плотности аналогового сигнала [Ferris, 1968], свертки двух плотностей [Prabhu и Enloe, 1969] и расчета коэффициента B .

Когда сигнал ЧРК-ЧМ с большим индексом модуляции подвергается помехам от цифровых сигналов с угловой модуляцией, которые занимают небольшую ширину полосы по сравнению с шириной полосы полезного сигнала, коэффициент B рассчитывается приближенно с помощью формулы (7).

В [МККР, 1970-74а] приводятся вычисленные значения коэффициента B для помех сигналам ЧРК-ЧМ от цифровых ФМ сигналов.

Если полезный сигнал ЧРК-ЧМ испытывает помехи от мешающего сигнала ИКМ-ФМ или дельта-ФМ, который занимает большую ширину полосы по сравнению с полосой полезного сигнала, коэффициент B рассчитывается с помощью следующей упрощенной формулы:

$$B = 10 \log \frac{1}{bf^2} \left\{ \frac{2(\delta f)^2 P(f/f_m)}{P(f_0 - f) + P(f_0 + f)} \right\}. \quad (16)$$

Нормализованная спектральная плотность мощности мешающего сигнала $P(f)$, используемая в этой формуле, определяется по формуле (35а—35д), которая приводится в § 3.3, ниже.

2.1.4 Помехи от АМ сигналов сигналам ЧРК-ЧМ

Квазилинейные свойства сигналов с угловой модуляцией и малым индексом модуляции по отношению к мешающим сигналам, спектральные плотности которых изменяются несущественно в пределах полосы пропускания приемника, позволяют использовать для таких случаев следующую приближенную формулу:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Мощность помех в} \\ \text{телефонном канале} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Мощность мешающего сигнала в двух} \\ \text{соответствующих полосах шириной} \\ \text{4 кГц на входе приемника} \\ \text{Мощность теплового} \\ \text{шума в телефонном} \\ \text{канале} \end{array} \right\}$$

В этой формуле используются две полосы частот шириной 4 кГц, так как может иметь место асимметрия спектра мешающего сигнала по отношению к несущей полезного сигнала. Когда система с угловой модуляцией и большим индексом модуляции испытывает помехи от цифровых амплитудно-модулированных сигналов, которые занимают небольшую ширину полосы по сравнению с шириной полосы полезного сигнала, коэффициент B приближенно рассчитывается по формуле из § 2.1.2.2.

Вычисленные значения коэффициента B для помех, воздействующих на сигналы ЧРК-ЧМ от цифровых АМ сигналов, содержатся в [МККР, 1970-74а].

2.1.5 Помехи от узкополосной системы системе ЧРК-ЧМ

Теоретическое выражение из § 2.1.1 [Pontano и др., 1973] может быть применено для случая, когда мешающий сигнал произвольно модулирован, но ширина его полосы небольшая по сравнению с шириной полосы полезного сигнала. Помехи от систем ОКН сигналам ЧРК-ЧМ являются примером подобной ситуации. В [МККР, 1978-82а и Prasanna и др., 1977] приводятся результаты для нескольких систем ОКН, обладающих широким диапазоном характеристик.

В частности, для равномерно размещенных ОКН сигналов несущей частоты суммарная мощность помехи в основной полосе частот от всех источников помех в виде ОКН сигналов от одной мешающей сети близка к тепловому шуму равной мощности, начиная с пяти-шести несущих.

2.1.6 Помехи от ЧМ телевизионных сигналов сигналам ЧРК-ЧМ

Когда (1) ЧМ телевизионный сигнал, модулированный только сигналом дисперсии, представляет собой мешающий сигнал, (2) полезный сигнал ЧРК-ЧМ с небольшим количеством телефонных каналов имеет спектр, ширина которого соразмерна с шириной спектра мешающего сигнала, и (3) совпадают несущие частоты, формула (4) принимает вид:

$$D(f, 0) = P \left[\int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} S(F) dF - \int_{f+\Delta f/2}^{f-\Delta f/2} S(F) dF \right] = 2P \int_{-\Delta f/2+f}^{\Delta f/2+f} S(F) dF, \quad (17)$$

где

Δf : девиация частоты сигналом дисперсии (полный размах частоты сигнала);

$P = 1/\Delta f$: спектральная плотность мощности мешающего сигнала (см. рис. 3, $i = 1$).

При вышеописанных условиях и со ссылкой на формулу (3) можно считать, что

$$\int_{-\Delta f/2+f}^{\Delta f/2+f} S(F) dF \approx 1, \quad \text{если } f < f_{m1}; \quad (18)$$

таким образом,

$$B = 10 \log \frac{(\delta f)^2 \Delta f p (f/f_m)}{f^2 b}. \quad (19)$$

2.1.7 Помехи от остатка сигнала несущей частоты системы с ЧРК-ЧМ с малым индексом модуляции

Особое внимание следует обратить на значительное влияние синусоидальной помехи от остатка несущей в системах с ЧРК-ЧМ с малым индексом модуляции. Мощность шумов от помехи ($P_{\epsilon\delta}$) в точке нулевого относительного уровня выражается [Chen, 1980]:

$$P_{\epsilon\delta} = \frac{1}{2m_1^2} 10^{\frac{1}{10}y} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(K)^{2n}}{n^2} Dn \frac{(\sigma)^2}{p(\sigma)} \delta(\sigma - n\sigma d)_I, \quad (20a)$$

где

$$K = (I/C)^{\frac{1}{2}}; \quad (20b)$$

$$D_n = \begin{cases} e^{-n m_e^2} & \text{для помехи от немодулированного сигнала низшей частоты;} \\ e^{-2n m_e^2} & \text{для помехи от сигнала ЧРК-ЧМ с таким же модулирующим сигналом;} \end{cases} \quad (20c)$$

$$m_e^2 = \left[C_0 + (C_2/\beta) + \frac{C_4}{3\beta^3} (\beta^2 + \beta + 1) \right] m_{e0}^2; \quad (20d)$$

$$m_{e0}^2 = m_1^2 \beta. \quad (20e)$$

β — отношение верхней частоты к нижней в основной полосе частот полезного сигнала.

$$\sigma = f/f_{m1}; \quad (20f)$$

$$p(\sigma) = C_0 + C_2(\sigma)^2 + C_4(\sigma)^4; \quad (20g)$$

$$\delta(\sigma - \sigma d)_I = \begin{cases} 1; & \sigma = \sigma d; \\ 0; & \sigma \neq \sigma d. \end{cases} \quad (20h)$$

В случаях, когда разность частот f между сигналами несущей частоты полезного и мешающего сигналов попадает в область основной полосы частот или в определенные области, например занимаемые пилот-сигналом, полосой для измерения шумов, возможными служебными сигналами на поднесущей частоте в верхней части спектра и сигналами DAV на поднесущей частоте, влияние синусоидальной помехи становится значительным. В этом случае расчетные требования для помехи должны определяться синусоидальной помехой (Chen, 1980; МККР, 1986—1990, Документ 4/333 — 9/358).

2.2 Полезный телефонный сигнал вида один канал на несущей с ЧМ

По этому вопросу требуются дальнейшие исследования.

2.3 Частотно-модулированный телевизионный полезный сигнал

Защитное отношение (R), которое может быть введено, представляет отношение сигнала к помехе, соответствующее данному ухудшению. Значения R на рис. 2 выражены в зависимости от разнеса несущих частот (f_0) полезного и мешающего сигналов; они получены в результате проведенных во Франции испытаний, в которых мешающий сигнал представлял собой немодулированную несущую. Кривая на рис. 2, образованная из двух отрезков прямых и двух лучей, является эмпирической кривой, изображенной на основе тестовых данных (ΔF — девиация частоты в области низких частот полезного сигнала, в МГц).

Был выбран такой субъективный уровень помех, который соответствовал порогу восприимчивости при отсутствии теплового шума, определяемому наблюдателем, находящимся в слабо освещенном помещении на расстоянии от экрана, в шесть раз превышающем высоту изображения.

Допустимое значение отношения сигнала к помехе $(C/I)_a$ получается с помощью выражения:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_a = \int_{-\infty}^{+\infty} R(f - f_0) A(f) [P(f) + P_0 \delta] df, \quad (21)$$

где $P(f)$, P_0 и $A(f)$ имеют те же значения, что и в § 2.1.1.

Сразу же после определения спектра мешающего сигнала (см. § 3) может быть вычислено отношение сигнала к помехе $(C/I)_a$.

2.4 Амплитудно-модулированный телефонный полезный сигнал

2.4.1 Общие сведения

По этому вопросу требуются дальнейшие исследования.

2.4.2 Помехи между амплитудно-модулированными сигналами

Коэффициент K_4 определяется как величина (в дБ), на которую отношение мощностей сигнала к помехе превышает отношение спектральной плотности сигнала в соответствующей полосе шириной 4 кГц на входе приемника к плотности мощности помехи в полосе такой же ширины.

Поскольку свойство линейной модуляции состоит в том, что мешающий сигнал непосредственно переносится в основную полосу, значение коэффициента K_4 определяется просто как 0 дБ для систем с одной боковой полосой с подавленной несущей и как 3 дБ для двухполосных систем с подавленной несущей.

2.4.3 Помехи амплитудно-модулированным сигналам от сигналов с угловой модуляцией

Значение коэффициента K_4 составляет опять-таки 0 дБ для систем с одной боковой полосой с подавленной несущей и 3 дБ для двухполосных систем с подавленной несущей.

Спектр основной полосы помехи будет тождествен спектру мешающего РЧ сигнала в случае использования системы с одной боковой полосой с подавленной несущей, а в случае использования двухполосной системы с подавленной несущей он будет тождествен сумме спектров мешающих РЧ сигналов, попадающих на верхнюю и нижнюю боковые полосы. В результате помеха с угловой модуляцией с сильно выраженными несущими будет генерировать тональную помеху в основной полосе. План размещения частот радиостовов в АМ системах обычно требует учета такого вида помех.

2.5 Цифровой полезный сигнал

Выражения для характеристик цифровых систем с некодированной модуляцией и когерентным приемом в гауссовом канале хорошо известны [Proakis, 1983]. Однако на практике вариант чисто гауссового канала встречается редко. Принимаемый сигнал является случайным процессом, состоящим из двух компонент, первая из которых представляется гауссовым шумом, а вторая — всеми остальными источниками помех, такими как помеха на совпадающей частоте (CCI), помеха от среднего радиостовла (ACI) и межсимвольная интерференция (ISI). В принципе может быть получена характеристика зависимости вероятности ошибки от этой помехи. Возможные методы включают непосредственные вычисления/моделирование, численный метод с компьютерным моделированием рядов Грама—Шарлье, правило гауссовых квадратур, интегрирование в комплексной плоскости и граничные методы.

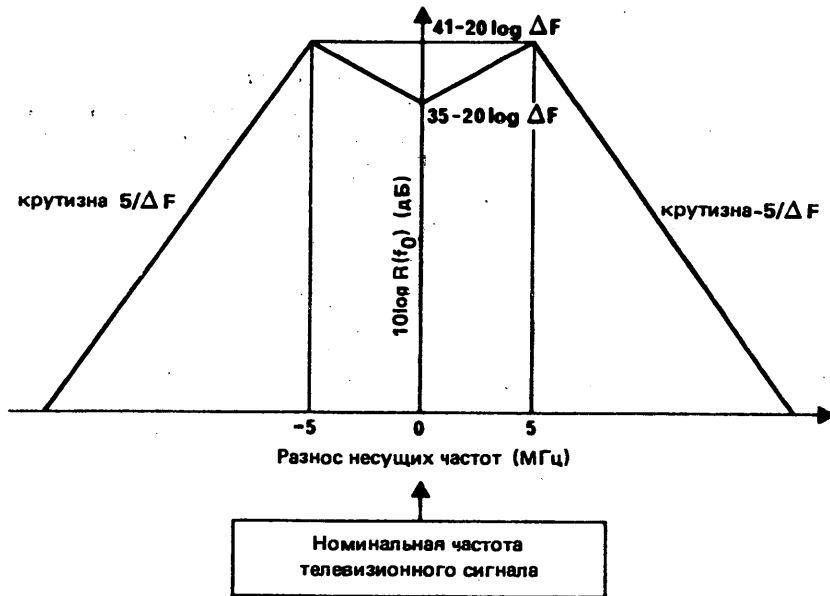


РИСУНОК 2 — Защитное отношение R (выраженное в дБ)

Полезный сигнал: частотно-модулированный ТВ сигнал
Мешающий сигнал: чистая несущая

ΔF : девиация частоты в области низких частот полезного сигнала (частотно-модулированной ТВ), в МГц

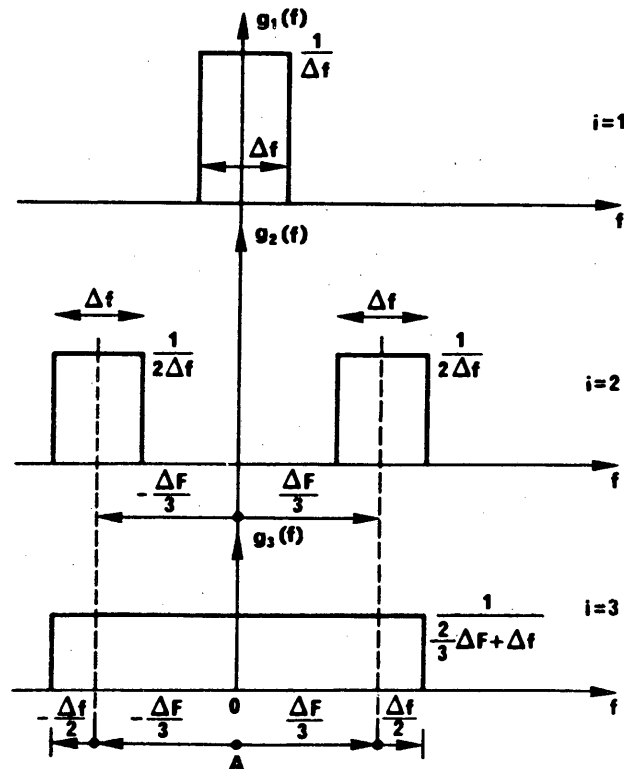


РИСУНОК 3 — Частотно-модулированный телевизионный сигнал

Модели, используемые для представления центральной части спектра

A: Номинальная частота

2.5.1 *Случай гауссовой помехи*

Зависимости вероятности ошибки для методов модуляции: бинарной фазовой манипуляции (BPSK = 2-ФМ), М-уровневой ФМ (М-ФМ) ($M > 2$), М-уровневой квадратурной амплитудной модуляции (М-КАМ), М-уровневой квадратурной модуляции с парциальным откликом (MQPR) и BPSK с автокорреляционным декодированием (DPSK) — задаются следующими выражениями:

$$P_B \doteq \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma_b}) , \quad (2\text{-ФМ}) \quad (22)$$

$$P_{DBPSK} = \frac{1}{2} e^{-\gamma_b} , \quad (23)$$

$$P_M \doteq \operatorname{erfc}\left(\sqrt{k \gamma_b} \sin \frac{\pi}{M}\right) , \quad (\text{М-ФМ}, M > 2) \quad (24)$$

$$P_L \doteq \left(1 - \frac{1}{L}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{1}{2} \gamma_{av}}\right) , \quad (\text{М-КАМ}) \quad (25a)$$

$$P_L \doteq \left(1 - \frac{1}{M}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \gamma_{av}}\right) , \quad (\text{MQPR}) \quad (26a)$$

$$P_M = 2P_L \left(1 - \frac{1}{2} P_L\right) , \quad \text{М-КАМ и MQPR} \quad (25b, 26b)$$

где

$$\gamma_b = \frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \frac{B}{f_b} ; \quad (27)$$

P_B — вероятность ошибки для системы с 2-ФМ;

P_M — коэффициент ошибок на символ для систем М-ФМ ($M > 2$), М-КАМ и MQPR;

P_L — вероятность ошибки сигнала основной полосы частот в каждой из двух квадратурных компонент для систем с КАМ и QPR;

P_{DBPSK} — вероятность ошибки для системы 2-ФМ с автокорреляционным декодированием;

γ_{av} — среднее отношение сигнала к шуму на k -битный символ;

$k = \log M$ и M — число состояний;

L — количество уровней в основной полосе частот, то есть $M=L^2$;

γ_b — отношение энергии на бит к шуму;

(C/N) — отношение сигнала к тепловому шуму;

f_b — скорость передачи бит в бит/с, и

B — двусторонняя шумовая полоса частот в Гц. Предполагается, что B равно ширине двусторонней полосы частот Найквиста.

Выражения (22) и (24) — (25) дают кривые зависимости вероятности ошибки, представленные на рис. 4.

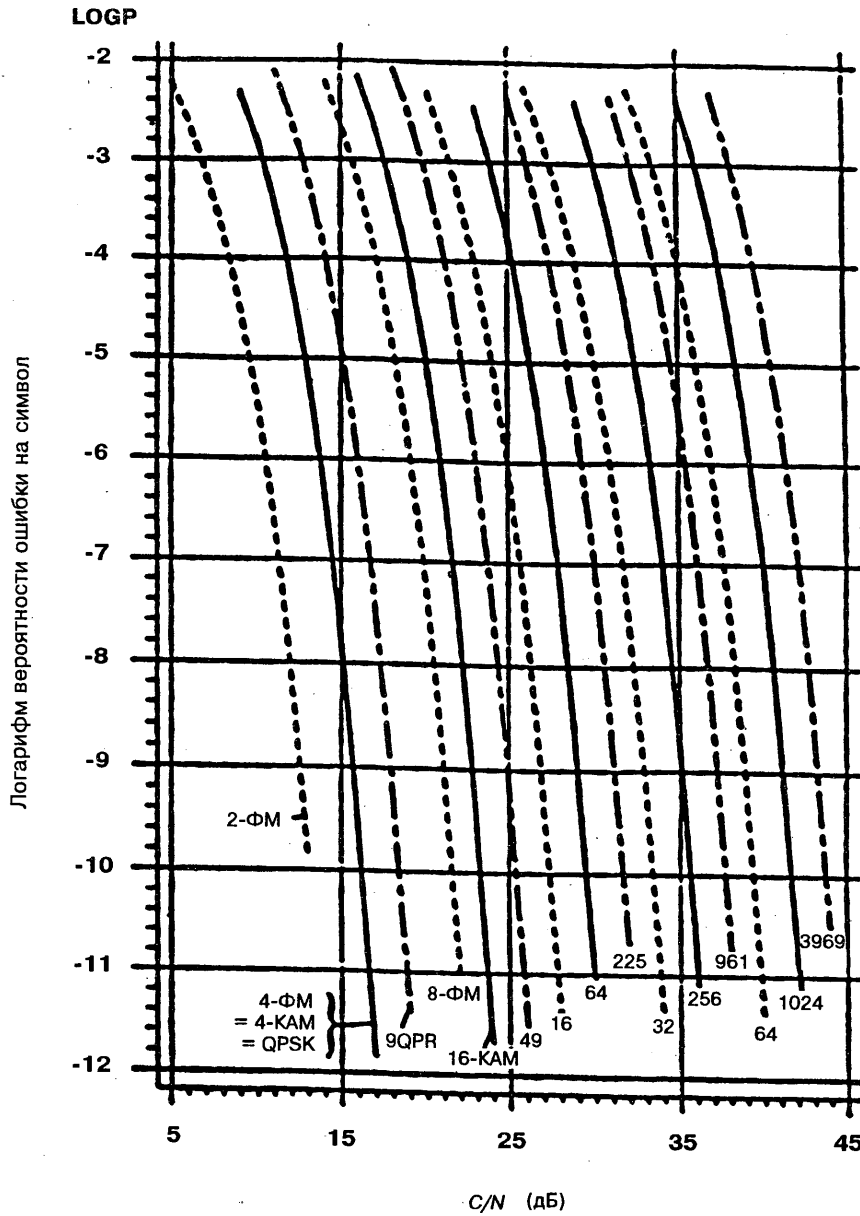


РИСУНОК 4 — Зависимость средней вероятности ошибки M -уровневых методов модуляции от отношения сигнала к шуму (измеренного в двусторонней полосе частот Найквиста) для канала только с белым гауссовым шумом

— методы M-KAM
 --- методы M-FM
 - · - методы MQPR

В случае систем с М-КАМ, в которых используется очень сильная фильтрация (такая как приподнятый косинус Найквиста), помеху можно рассматривать как гауссово-подобный шум. Приемник с М-КАМ может подвергаться помехам от одного или нескольких источников. Амплитудные искажения сильно отфильтрованного сигнала помехи проявляются в большом отношении пикового значения к среднему, что может быть аппроксимировано эквивалентным источником гауссово-подобного шума. В случае нескольких источников помех помехи от этих источников рассматриваются как случайные независимые переменные величины. Согласно центральной предельной теореме, при некоторых общих условиях функция распределения плотности вероятности результирующей эквивалентной помехи аппроксимируется нормальной гауссовой кривой при увеличении числа источников помех. В обоих случаях — одиночной и множественной помехи — эквивалентная помеха может быть представлена в виде гауссово-подобного шума. Этот практический подход дает полезные кривые качественных показателей, на которых можно легко видеть ухудшение вследствие помехи.

Общее отношение сигнала к шуму $(C/N)_T$ при объединении гауссово-подобной помехи с белым гауссовым шумом задается выражением:

$$(C/N)_T = [(N/C) + (I/C)]^{-1}; \quad (28a)$$

$$(I/C) = (I_1/C) + (I_2/C) \dots + (I_n/C), \quad (28b)$$

где

(N/C) — отношение теплового шума к сигналу;

(I/C) — отношение эквивалентной помехи к сигналу;

(I_i/C) ($i = 1, \dots, n$) — отношение помехи к сигналу для i -го случайного источника.

Для расчета характеристик цифровой системы с когерентным приемом в присутствии помехи используются известные выражения (22 — 25) с заменой (C/N) на $(C/N)_T$, применяя (C/I) как переменный параметр. Включение (C/I) в качестве переменного параметра дает ряд кривых на рис. 5—6. На рис. 7 представлены обобщенные данные зависимости ухудшения в децибелах (дБ) $(C/N)_T - (C/N)$ при $P_e = 10^{-6}$ от отношения C/I для систем М-КАМ. Если отношение сигнала к помехе по крайней мере на 10 дБ больше, чем отношение сигнала к тепловому шуму, требуемому для $P_e = 10^{-6}$, ухудшение вследствие помехи будет менее 1 дБ. Хотя это и не показано на рис. 7, можно рассчитать, что, если C/I по крайней мере на 6 дБ больше, чем C/N для $P_e = 10^{-3}$, ухудшение вследствие помехи будет меньше 1 дБ.

Однако гауссово-подобная помеха не обязательно является худшим случаем. Администрациям следует обязательно провести изучение новых методов для определения общего влияния помех между системами с М-КАМ и другими цифровыми и аналоговыми системами.

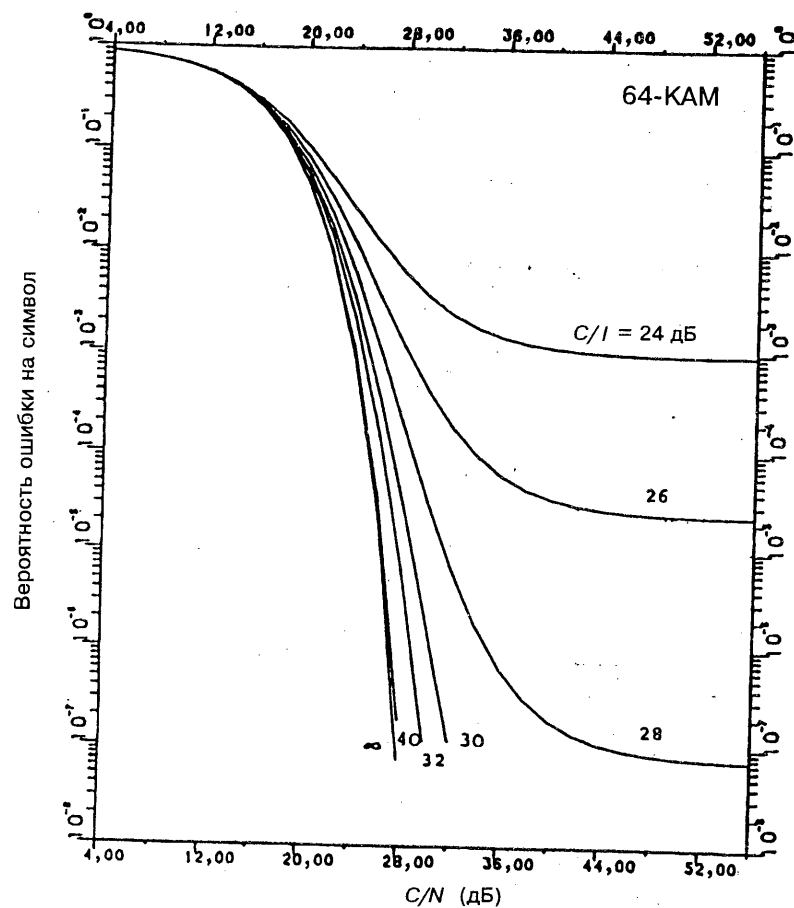


РИСУНОК 5 – Кривые зависимости вероятности ошибки системы с модуляцией 64-QAM от отношения сигнала к шуму и, как параметр, от отношения сигнала к помехе.

Двусторонняя полоса частот Найквиста

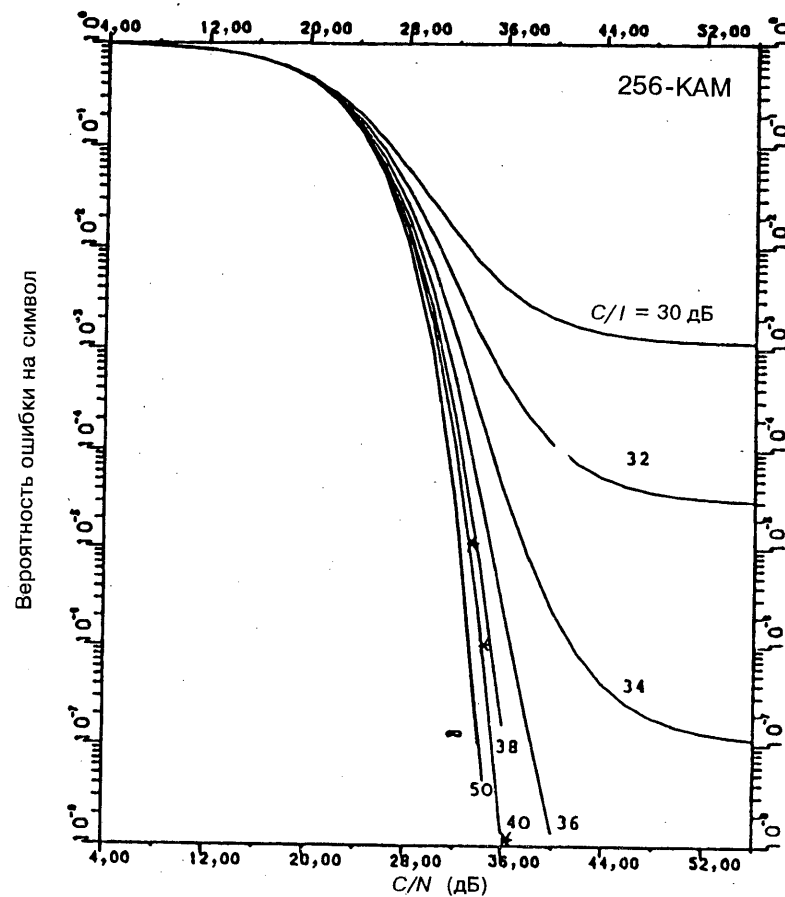


РИСУНОК 6 – Кривые зависимости вероятности ошибки системы с модуляцией 256-QAM от отношения сигнала к шуму и, как параметр, от отношения сигнала к помехе.

Двусторонняя полоса частот Найквиста
 (***) представляет результаты измерений модемов 1,6 Мбит/с,
 $C/I = 40$ дБ

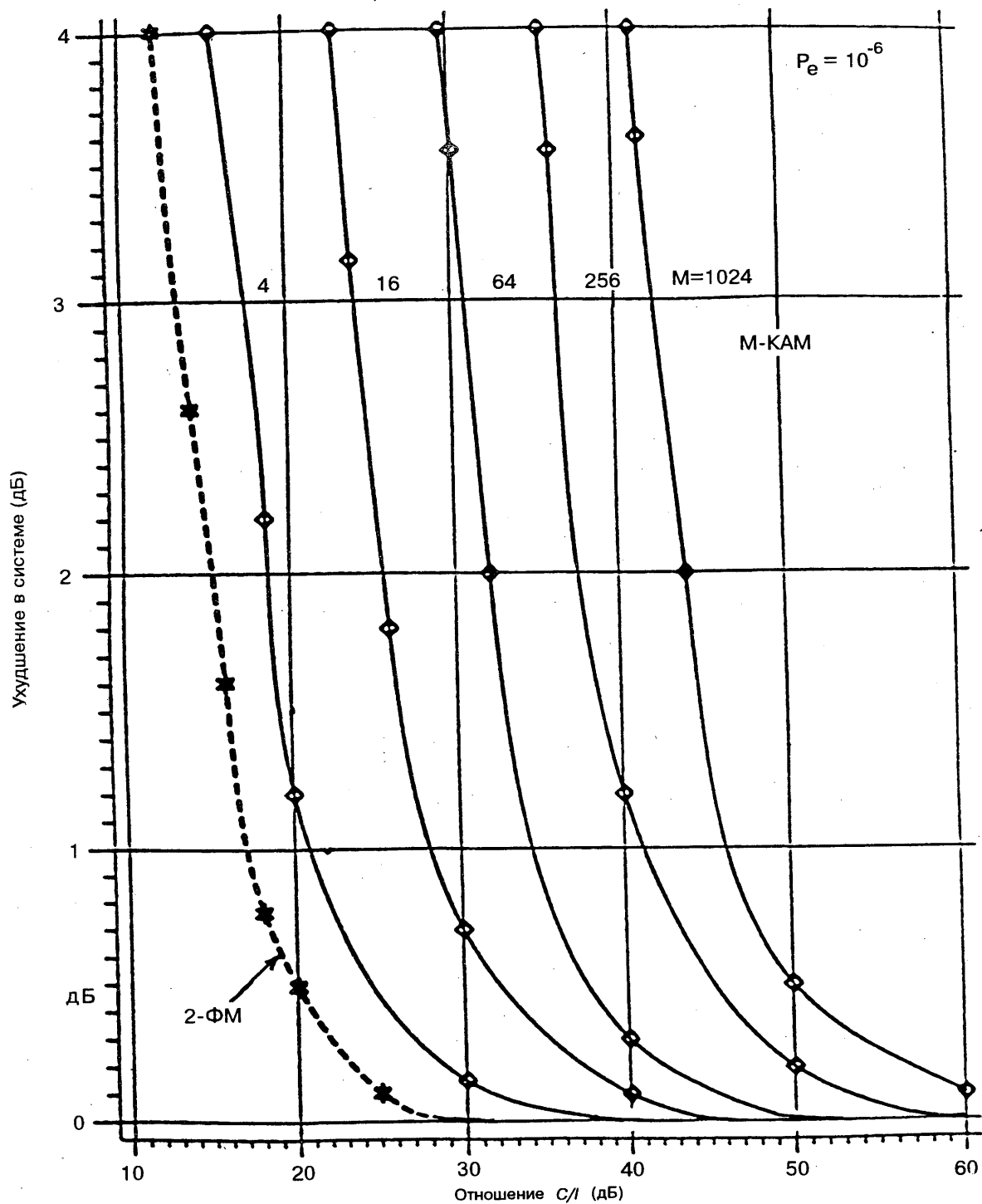


РИСУНОК 7 — Зависимость потерь системы с М-КАМ относительно теоретического значения, необходимого для обеспечения показателя $P_e = 10^{-6}$, от отношения сигнала к помехе в двусторонней полосе Найквиста, в дБ

2.5.2 Метод гауссова правила квадратур

В настоящем разделе представлены графики зависимости коэффициентов ошибок по битам 10^{-3} и 10^{-6} от отношений C/I и C/N в качестве переменных. Эти графики получены при использовании метода квадратур Гаусса, описанного в [Benedetto и др., 1973]. Эти кривые относятся к помехам на совпадающих и соседних частотах в системах с 4-ФМ, 16-КАМ и 64-КАМ при нескольких видах сигналов помехи. Предполагается, что фильтры передачи и приема полезной и мешающей систем имеют передаточные характеристики фильтров в виде приподнятого косинуса с коэффициентом скругления 0,4 и 0,5, типичным для спутниковых систем. Передающий фильтр также включает корректор АЧХ для обеспечения условий отсутствия межсимвольной интерференции. Для сравнения на каждом графике представлена кривая, полученная в предположении гауссовой помехи (см. раздел 2.5.1).

На рис. 8—12 C/I' определено как отношение между мощностью сигнала несущей частоты на входе приемного фильтра и мощностью помехи на выходе приемного фильтра. Отношение мощностей сигнала несущей частоты и помехи на входе приемного фильтра может быть определено путем вычитания соответствующего коэффициента подавления помехи, который приведен на рисунках. Также на этих рисунках C/N представляет отношение между мощностью сигнала несущей частоты на входе приемного фильтра и мощностью шума на выходе приемного фильтра. Отношение сигнала к шуму на выходе приемного фильтра примерно на 0,5 дБ меньше вследствие затухания спектра полезного сигнала в приемном фильтре.

Рис. 8—10 относятся к помехам от радиостволов на совпадающих и соседних частотах в системах с 4-ФМ, 16-КАМ и 64-КАМ при нескольких значениях частотного разнеса между двумя одинаково модулированными сигналами несущих частот. На рис. 11 представлен случай помехи на совпадающей частоте между двумя системами с сигналами 4-ФМ и различной относительной шириной полосы частот. На рис. 12 показано влияние помехи от сигналов с различными видами модуляции на характеристики системы с 4-ФМ.

Изучение рисунков позволяет сделать следующие общие выводы:

- когда мощность мешающего сигнала равна или больше мощности теплового шума, влияние помехи с угловой модуляцией значительно меньше, чем влияние белого гауссова шума равной мощности;
- когда мощность мешающего сигнала мала по сравнению с мощностью теплового шума, влияние на коэффициент ошибок можно надежно оценить, предполагая, что мешающий сигнал эквивалентен гауссову шуму равной мощности;
- при заданном отношении сигнала к помехе чувствительность к помехам значительно возрастает с увеличением числа передаваемых символов, M ;
- при одной и той же мощности помехи после фильтрации влияние помех имеет тенденцию к возрастанию при увеличении частотного разнесения между сигналами несущих частот; это влияние также имеет тенденцию к возрастанию при увеличении ширины полосы частот мешающего сигнала и увеличении числа мешающих сигналов; оно примерно одинаково для мешающих сигналов с модуляцией 4-ФМ и 8-ФМ, но возрастает с увеличением числа символов для мешающих сигналов с КАМ; все вышеупомянутые ситуации могут быть интерпретированы как увеличение пик-фактора сигнала помехи; в случае больших значений частотного разнесения (помеха от соседнего радиоствола), в случае больших значений ширины полосы частот мешающего сигнала и в случае большого количества сигналов помехи влияние помехи примерно такое же, как от белого гауссового шума равной мощности.

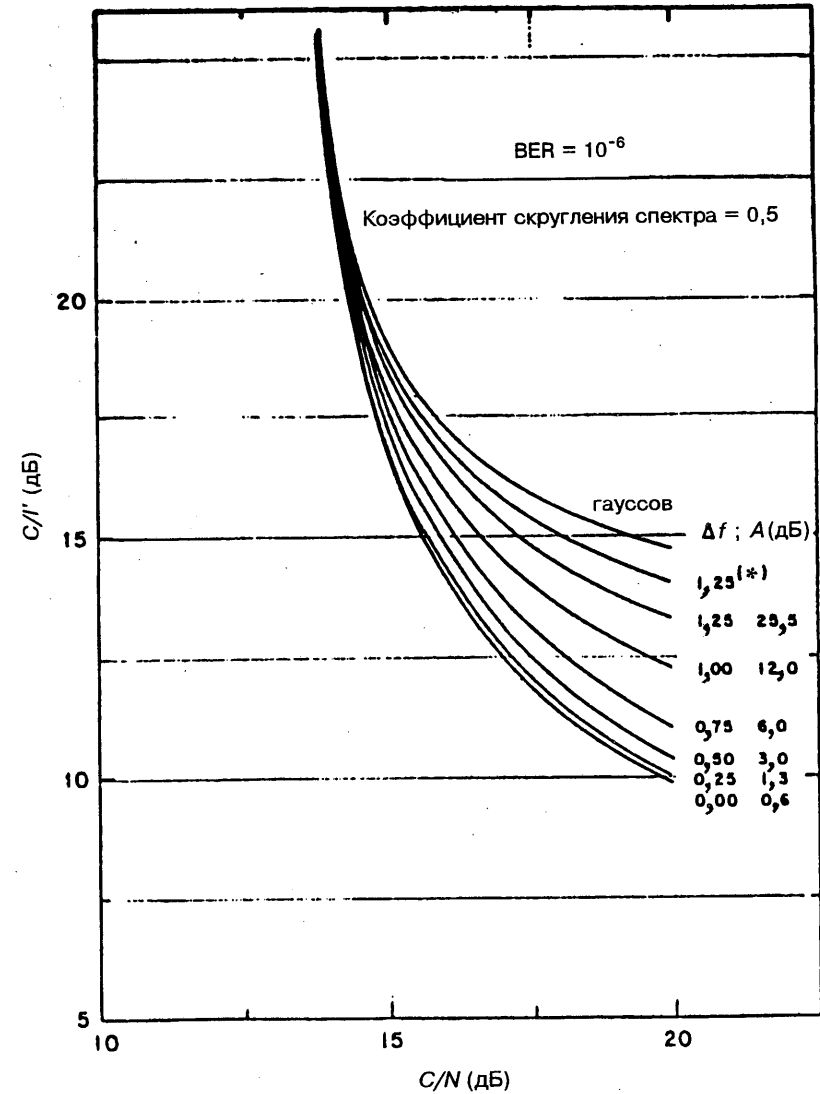
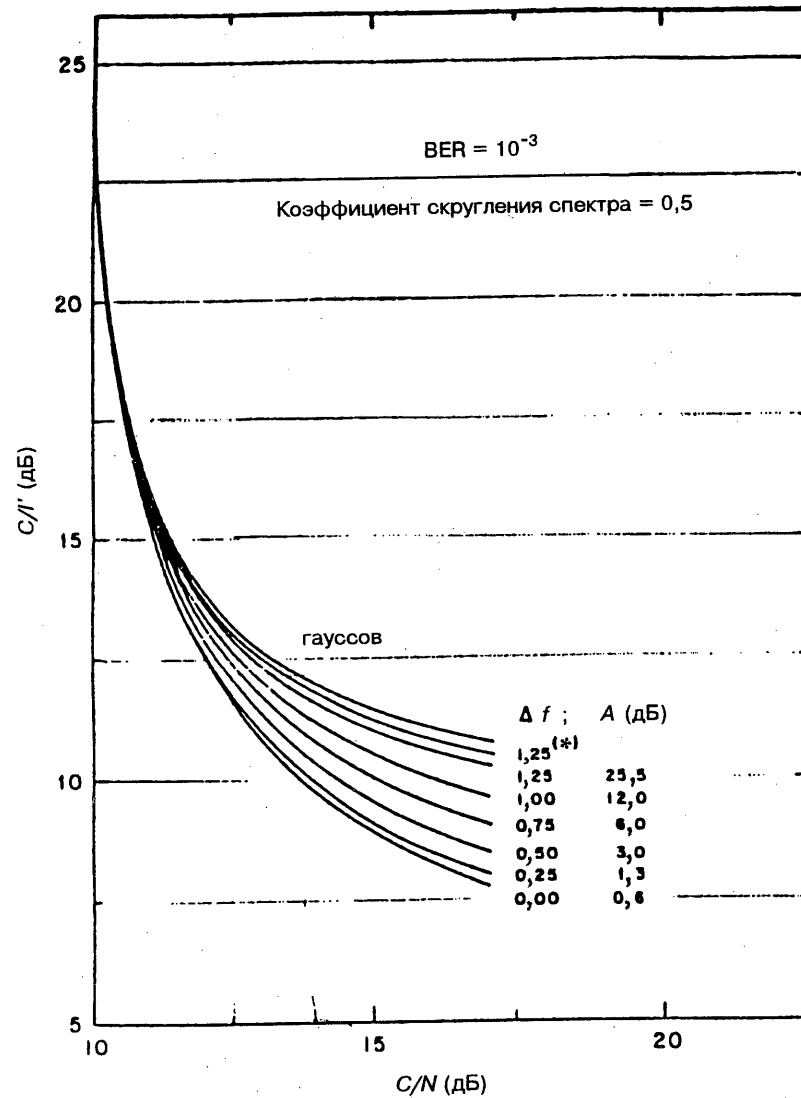


РИСУНОК 8 - C/I' от C/N для системы с 4-ФМ при сигналах помехи с 4-ФМ для BER 10^{-3} и 10^{-6}

Δf : частотное разнесение между сигналами (нормализованное по отношению к скорости передачи символов)

A (дБ): коэффициент подавления помехи, определяемый как отношение между мощностями помехи на входе и выходе приемного фильтра

* 2 соседних сигнала.

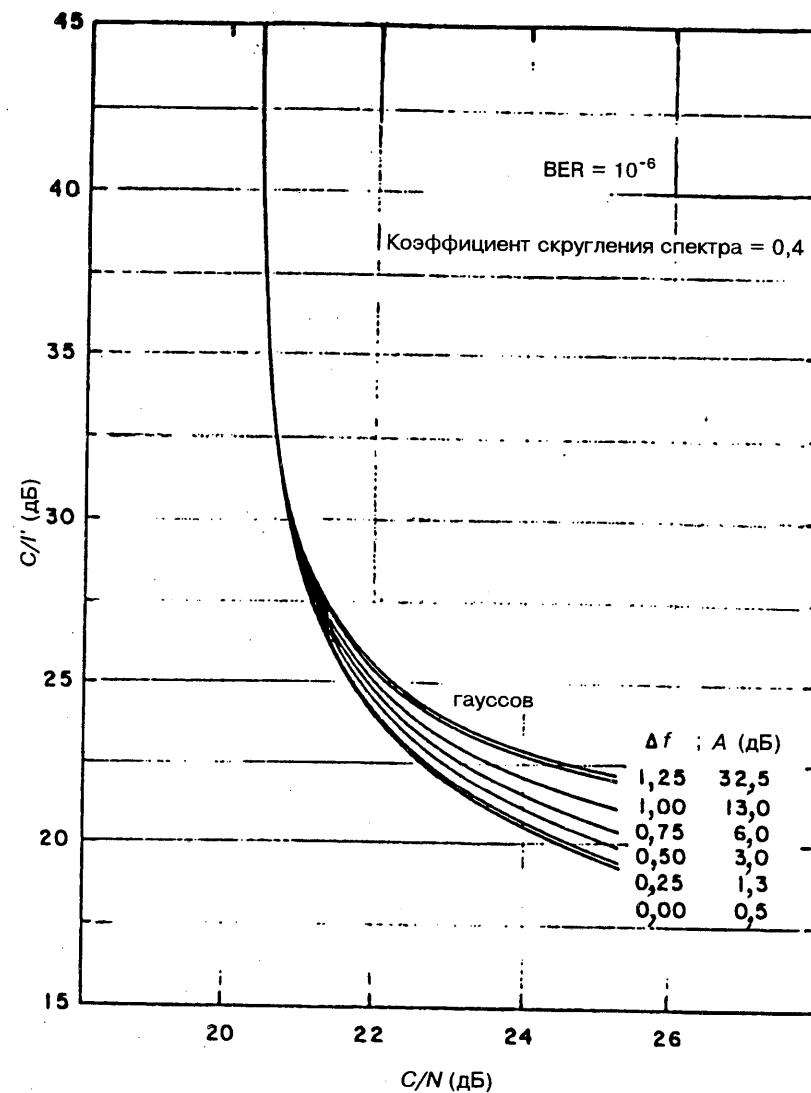
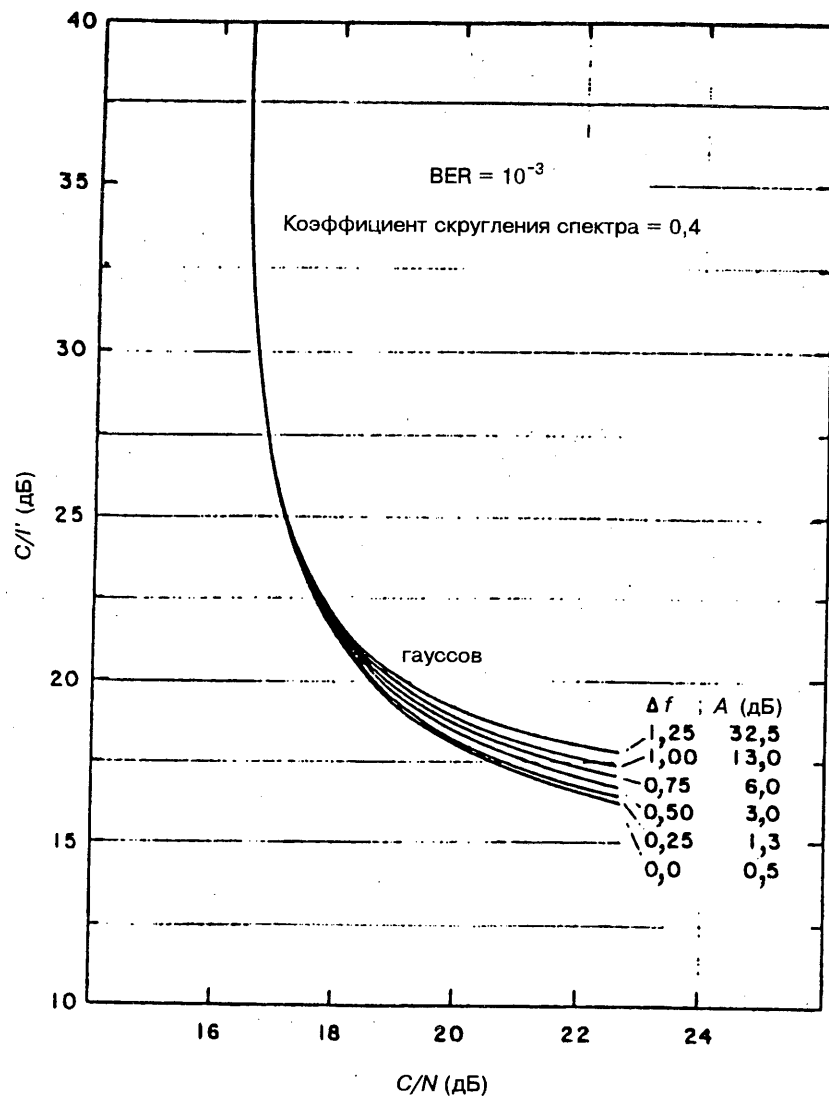


РИСУНОК 9 – C/I' от C/N для системы с 16-КАМ при сигналах помехи с 16-КАМ для BER 10^{-3} и 10^{-6}

Δf : частотное разнесение между сигналами (нормализованное по отношению к скорости передачи символов)

A (дБ): коэффициент подавления помехи, определяемый как отношение между мощностями помехи на входе и выходе приемного фильтра

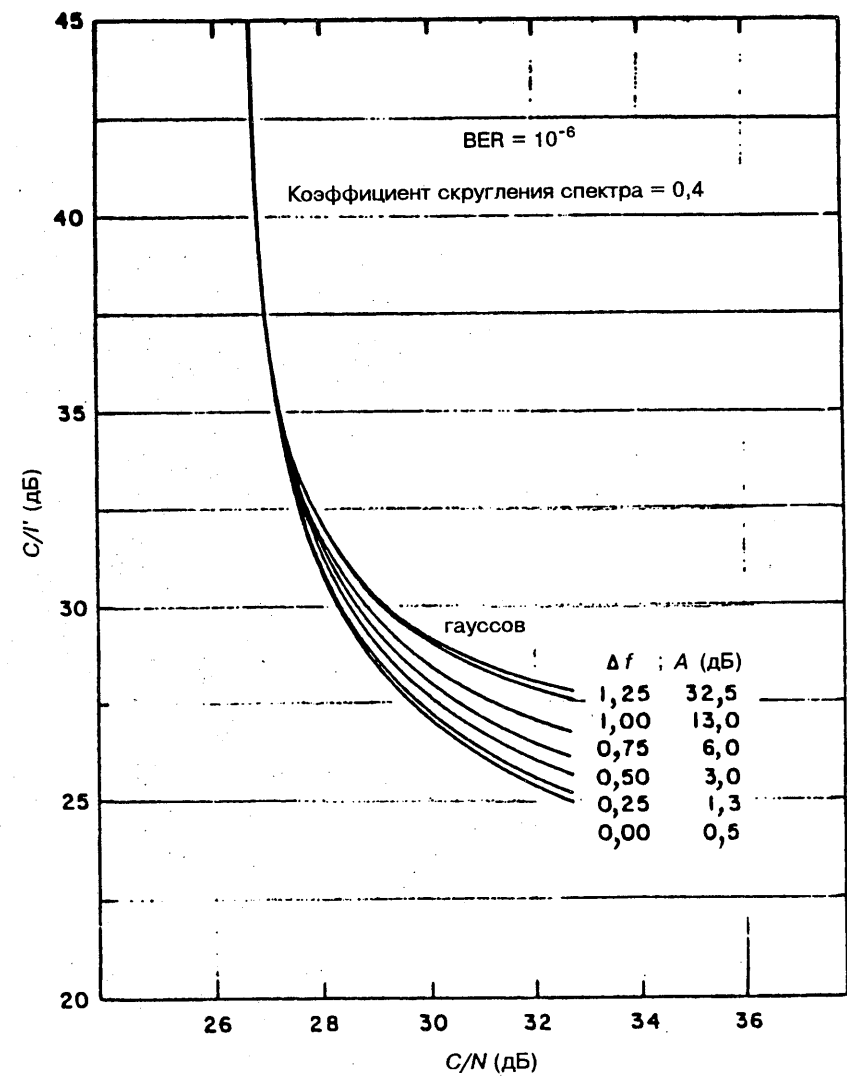
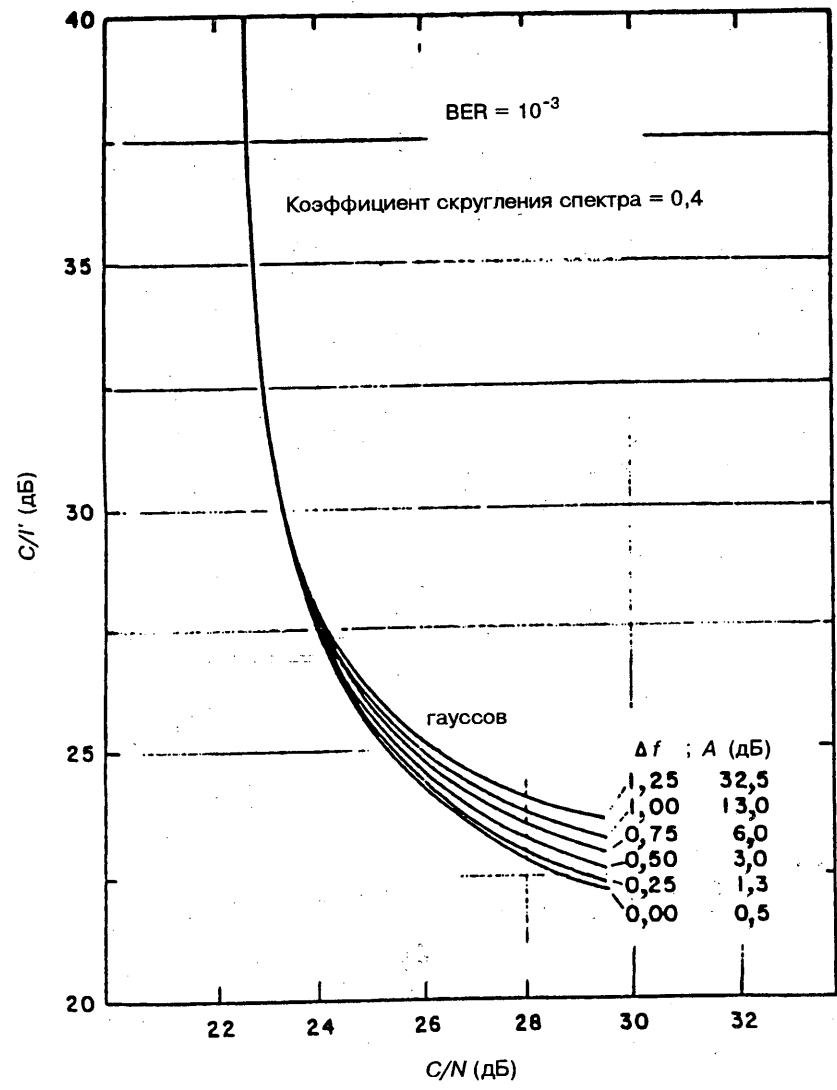


РИСУНОК 10 – C/I' от C/N для системы с 64-КАМ при сигналах помехи с 64-КАМ для BER 10^{-3} и 10^{-6}

Δf : частотное разнесение между сигналами (нормализованное по отношению к скорости передачи символов)

A (дБ): коэффициент подавления помехи, определяемый как отношение между мощностями помехи на входе и выходе приемного фильтра

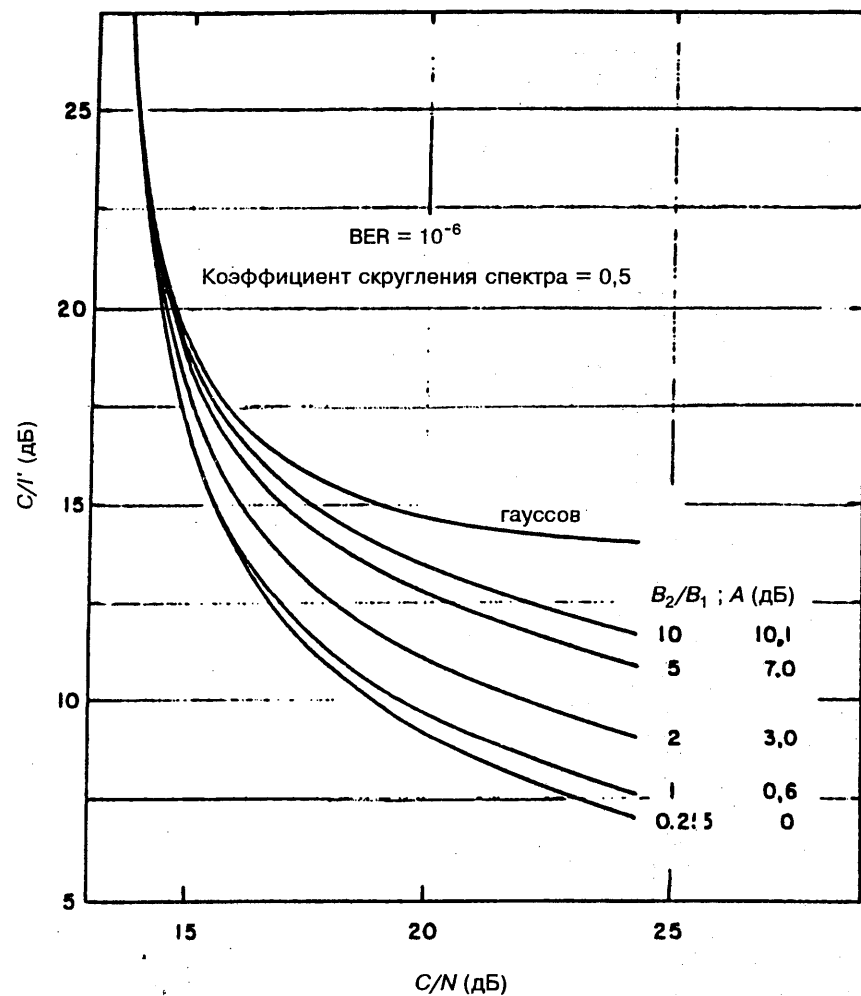


РИСУНОК 11 – C/I' от C/N для системы с 4-ФМ при сигналах помехи с 4-ФМ и различной шириной полосы частот для $BER = 10^{-6}$

B_1 : ширина полосы частот полезного сигнала
 B_2 : ширина полосы частот мешающего сигнала
 A (дБ): коэффициент подавления помехи, определяемый как отношение между мощностями помехи на входе и выходе приемного фильтра

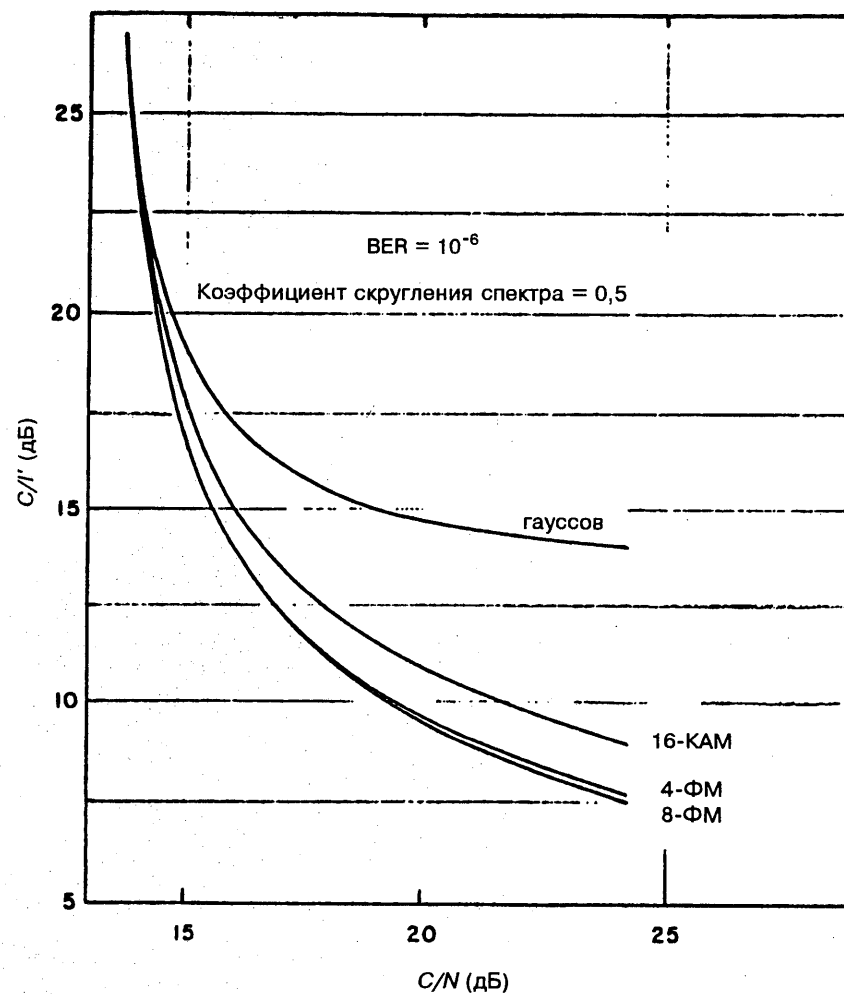


РИСУНОК 12 – C/I' от C/N для системы с 4-ФМ при сигналах помехи с ФМ и КАМ и равной шириной полосы частот для $BER = 10^{-6}$

2.5.3 Численный метод при компьютерном моделировании

Метод расчета, называемый численным методом при компьютерном моделировании, может быть использован для оценки характеристик обобщенных методов многоуровневой модуляции ФМ и КАМ со сдвигом и без сдвига, включая методы КАМ с модифицированной расстановкой позиций сигнала, при наличии аддитивной шумовой помехи и искажений [Chen, 1983 и 1986], [Chen, 1981, 1983 и 1986, МККР, 1986—1990а]. На рис. 13 приведены результаты расчета помехи от одного источника для системы с 16-КАМ. Кривые представляют результаты, полученные путем использования метода расчета, упомянутого выше. В целях сравнения на рис. 13 используется символ x для отображения результатов, полученных путем чисто цифровых расчетов по методу разложения в ряд. Они хорошо согласуются друг с другом.

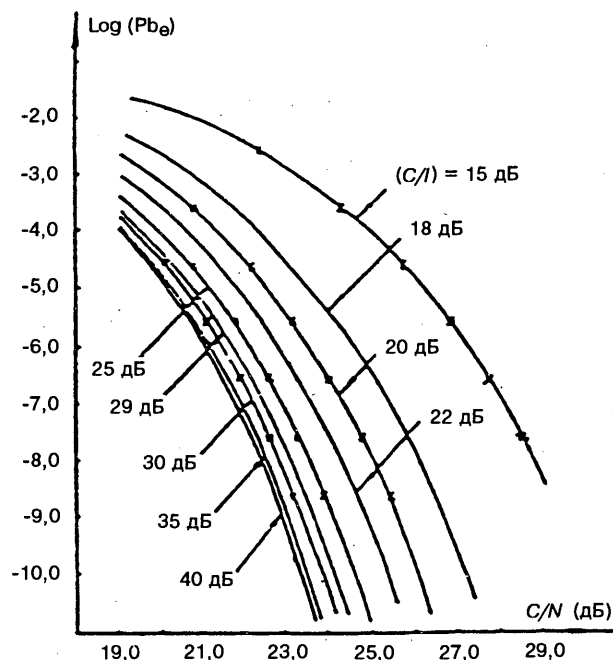


РИСУНОК 13

Этот метод может быть также использован для анализа суммарного влияния помехи и искажений, вносимых оборудованием. Ряд практических графиков, показывающих характеристику BER как функцию C/N и C/I для случаев и одной помехи, и нескольких источников помех, представлен в [Chen, 1983 и 1986; МККР, 1986-90а].

2.5.4 Граничные методы

Во многих практических ситуациях, когда отсутствует точное статистическое распределение различных помех, полезным методом является вычисление верхнего предела вероятности ошибки [Rosenbaum и Glave, 1974]. Для этого метода необходимо знать только отношение сигнала к шуму на входе демодулятора (C/N), отношение пикового значения к среднеквадратичному значению помехи и отношение мощностей полезного и мешающего сигналов (C/I). Следует заметить, что результаты применимы к теоретической системе и не учитывают ограничений реальной системы; они могут значительно изменяться при наличии дрожания и других ухудшающих факторов, которые встречаются в реальных системах.

Другие исследования, осуществляемые в настоящее время, позволяют получить результаты для различных случаев, имеющих практическое значение, включая влияние разнеса несущих частот полезного и мешающего сигналов [Davies, 1972].

На рис. 14—15 кривые представляют различные сочетания отношений сигнала к шуму (C/N) и отношений мощностей полезного и мешающего сигналов (C/I), которые, соответственно, дают следующие значения верхнего предела вероятностей ошибки: 10^{-3} и 10^{-7} . Эти кривые применимы к случаям с единичной помехой и с помехами от многих источников. Параметрические кривые представлены в зависимости от пик-фактора помехи:

$$PF = 20 \log \frac{R}{\tau_r}, \quad (29)$$

где

R : пиковое значение огибающей помехи;

τ_r : среднеквадратичное значение огибающей помехи.

Нефильтрованный сигнал с угловой модуляцией имеет значение пик-фактора:

$$PF = 0.$$

Результаты, подобные приведенным в [Rosenbaum, 1969] для единичного сигнала с угловой модуляцией (ЧМ, ФМ, КФМ или ОФМ), оказывающего помехи двухпозиционной системе с КФМ, могут быть получены непосредственно с помощью кривых, для которых $PF = 0$, на рис. 14—15. Соответствующие результаты для помехи, воздействующей на трех- и четырехпозиционную систему с КФМ, могут быть получены с помощью тех же кривых косвенным путем, предполагающим использование вышеупомянутых формул.

Изучение рисунков позволяет сделать следующие общие выводы:

- когда мощность мешающего сигнала равна или больше мощности теплового шума, влияние помехи с угловой модуляцией значительно меньше, чем влияние белого гауссова шума равной мощности;
- когда мощность мешающего сигнала мала по сравнению с мощностью теплового шума, влияние на коэффициент ошибок можно надежно оценить, предполагая, что мешающий сигнал эквивалентен гауссову шуму равной мощности;
- при данном отношении сигнала к помехе значительно увеличивается подверженность помехам по мере увеличения числа позиций фазы (M).

2.5.5 Помехи ОФМ сигналам от сигналов с угловой модуляцией

На рис. 16 представлены кривые, изображающие коэффициент ошибок на символ в зависимости от отношения сигнала к шуму (C/N), и с отношением C/I в качестве параметра для дифференциально-когерентных сигналов с 2, 4, 8 и 16 позициями фазы. Вероятность ошибки для дифференциального детектирования, как можно видеть, зависит от дополнительного параметра θ , который представляет относительное проскальзывание фазы помехи от выборки к выборке. Однако зависимость от θ уменьшается по мере того, как увеличивается число позиций фазы. В результате предполагается, что θ представляет собой равномерно распределенную случайную переменную для систем с числом позиций фазы, превышающим 4. Таким образом, средние вероятности ошибки были выведены для систем с $M = 8$ и 16, а для двух- и четырехпозиционных систем были выведены пределы вероятности.

Для ОФМ кривых справедливы те же выводы, что и для КФМ кривых, касающиеся относительного влияния помех в виде белого шума и сигналов с угловой модуляцией и зависимости этого влияния от M . Наряду с этим при дифференциальном детектировании в общем происходит большее ухудшение, чем при когерентном детектировании, кроме тех случаев, когда двухпозиционная ОФМ работает почти так же хорошо, как и двухпозиционная КФМ. Ухудшение, вызванное помехами, используется в качестве основы для сравнения, поскольку любые несоответствия только в шумовых характеристиках сглаживаются.

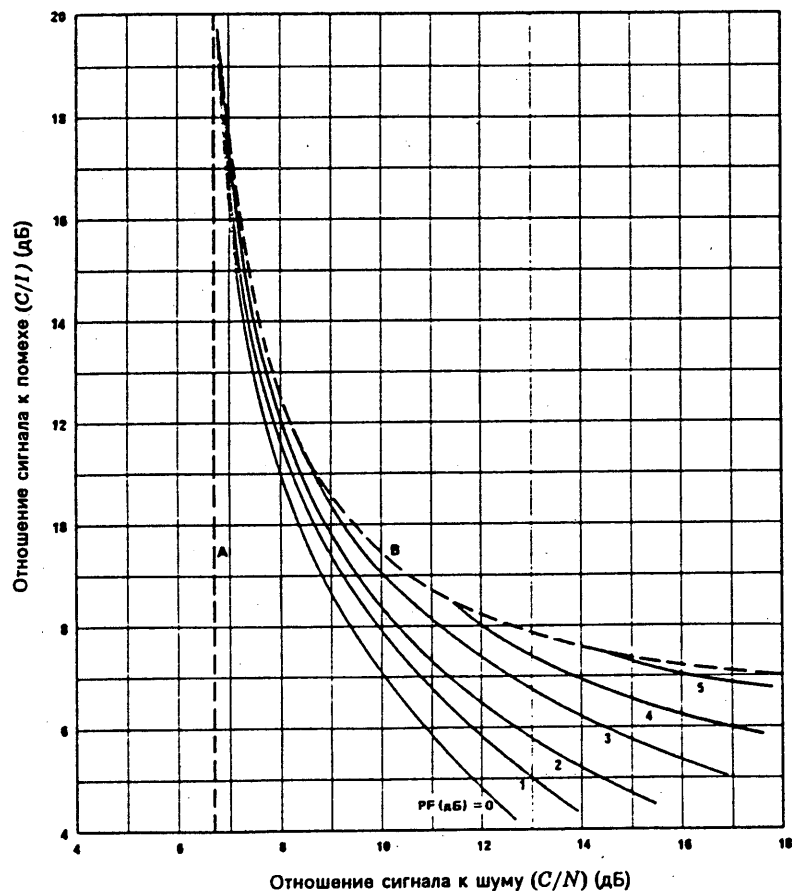


РИСУНОК 14 — Зависимость C/I от C/N при коэффициенте ошибок (BER) 10^{-3}

A: C/N при отсутствии помехи

B: помеха с характеристиками теплового шума

PF: пик-фактор помехи

Примечание. — Представлены теоретические кривые, не учитывающие ограничений реальной системы.

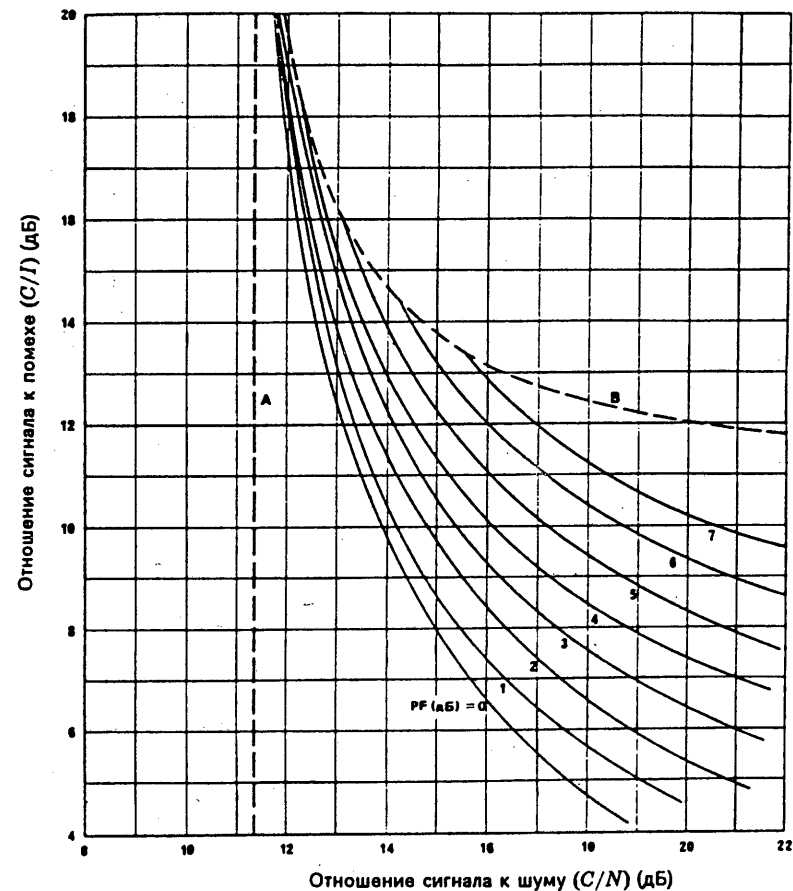


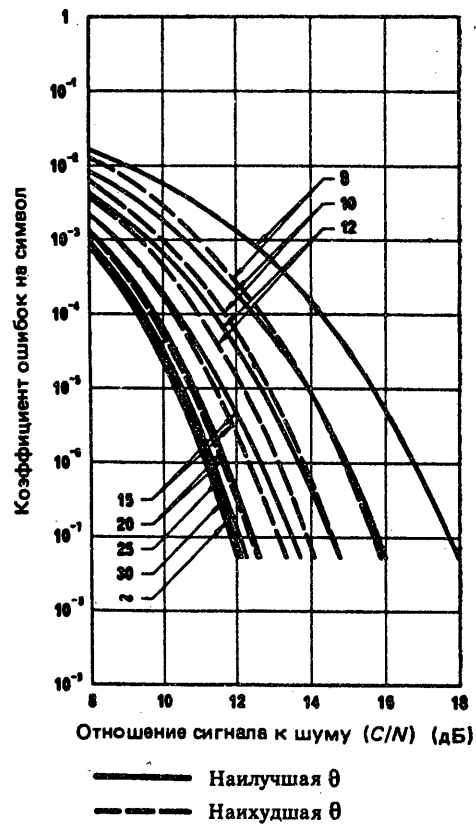
РИСУНОК 15 — Зависимость C/I от C/N при коэффициенте ошибок (BER) 10^{-7}

A: C/N при отсутствии помехи

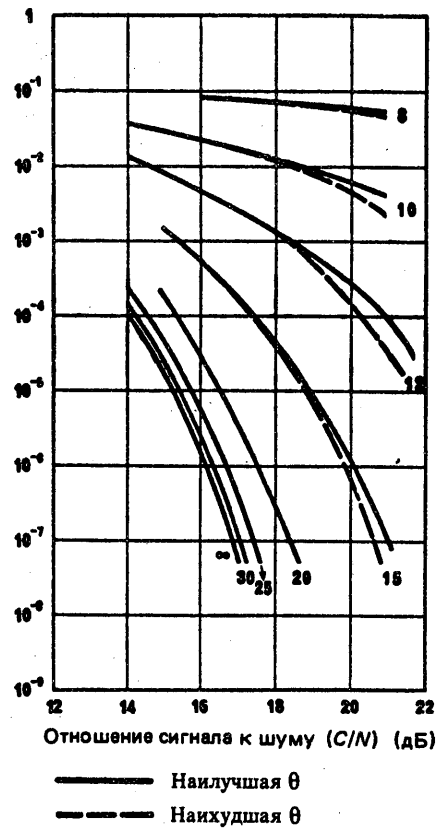
B: помеха с характеристиками теплового шума

PF: пик-фактор помехи

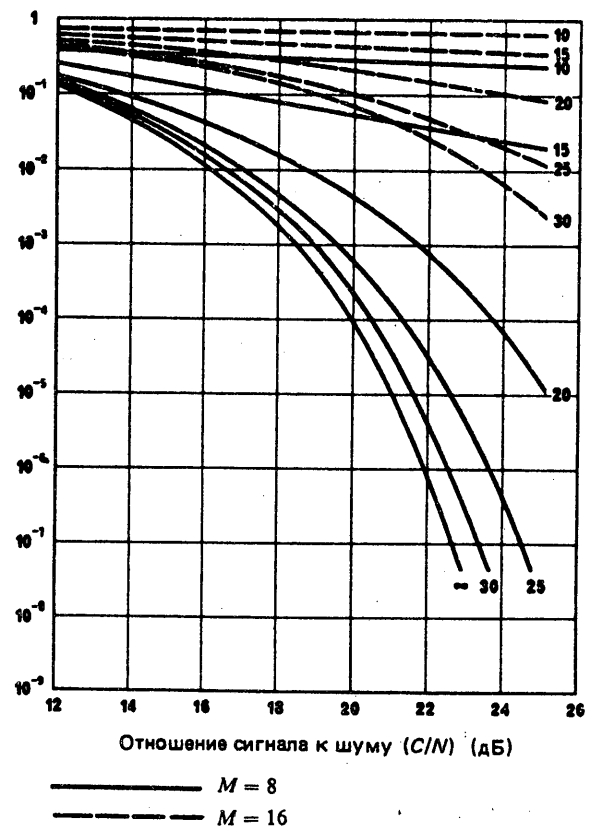
Примечание. — Представлены теоретические кривые, не учитывающие ограничений реальной системы.



(a) Двухфазная ($M=2$)



(b) Четырехфазная ($M=4$)



(c) Восьмифазная ($M=8$) и шестнадцатифазная ($M=16$)

(На каждой кривой показано отношение сигнала к помехе C/I (в дБ))

РИСУНОК 16 — Помеха ОФМ сигналу от сигнала с угловой модуляцией

[Злотникова и Дорофеев, 1987], моделируя ЧМ сигнал, прошедший через идеальный полосовой фильтр, рассчитали вероятность ошибки для ЧМ помехи, воздействующей на бинарную ФМ систему. На рис. 17 показана зависимость вероятности ошибки P_e как функция отношения эффективной девиации частоты радиосигнала ЧМ помехи f_g к полосе приемного фильтра ФМ сигнала Δf_c . Расчеты были проведены для пяти различных уровней помех по отношению к собственному шуму: 3 дБ (кривая 1), 0 дБ (кривая 2), -3 дБ (кривая 3), -6 дБ (кривая 4), -10 дБ (кривая 5). Отношение сигнала к шуму было взято равным 12,4 дБ, так как вероятность ошибки (и при наличии помех) не превышает 10^{-6} , что соответствует отношению сигнала к шуму 10,5 дБ при условии, что общий запас на помехи от всех наземных и спутниковых систем равняется по крайней мере 35%. Верхняя модулирующая частота ЧМ помехи f_B выбрана равной Δf_c . Таким образом, на рис. 17 показана также зависимость вероятности ошибки P_e как функции от эффективного индекса модуляции ЧМ сигнала помехи наряду со значениями вероятности ошибки P_e при наличии вместо ЧМ помехи дополнительного теплового шума с теми же уровнями на входе демодулятора, что и для ЧМ помехи (горизонтальные линии 1', 2', 3', 4', 5').

На практике спутниковые и радиорелейные системы работают при эффективном индексе модуляции не более 3. При анализе влияния существующих ЧМ систем на ФМ системы гауссова аппроксимация дает оценку сверху. Увеличение вероятности ошибки оказывается значительно меньшим для ЧМ помехи, чем для теплового шума той же мощности, так что допустимый уровень ЧМ помехи может быть увеличен сверх 6%, предварительно установленных в Рекомендации 523 МККР, в данном конкретном случае до 1,4 дБ.

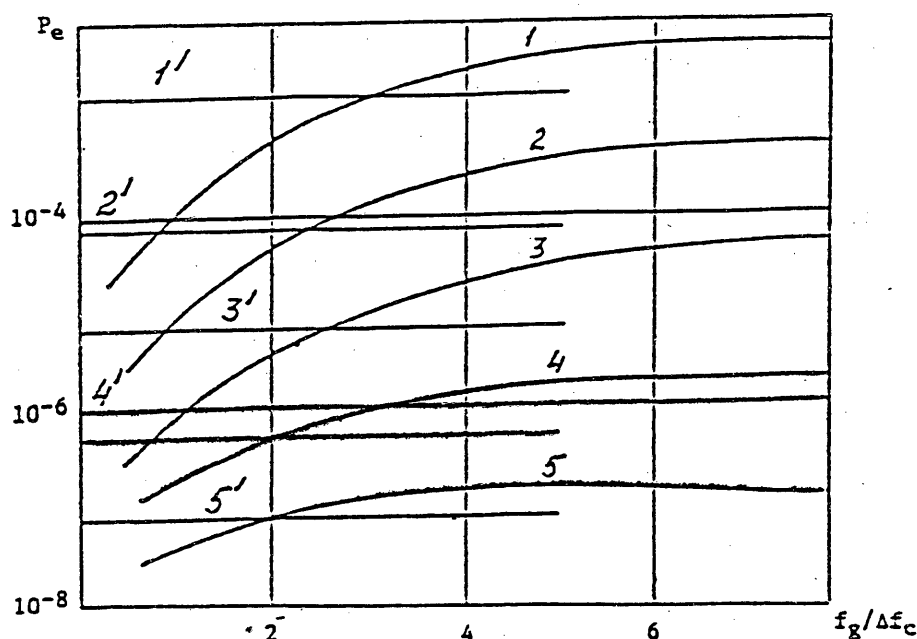


РИСУНОК 17 — Зависимость вероятности ошибки на бит от $f_g / \Delta f_c$

- 1: $I/N = 3$ дБ;
- 2: 0 дБ;
- 3: -3 дБ;
- 4: -6 дБ;
- 5: -10 дБ;
- 1', 2', 3', 4', 5' — гауссова аппроксимация.

3. Спектры сигналов

3.1 Аналоговый телефонный сигнал (ЧРК-ЧМ)

Нормализованная спектральная плотность мощности сигнала, центрированная на несущей частоте, выражается [Бородич, 1976] в виде:

$$P(f) = e^{-a} \left[\delta(f) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{m^{2n}}{n!} S(f)^n S(f) \right], \quad (30)$$

где

$\delta(f)$: дельта-функция Дирака;

$S(f)^n \cdot S(f)$: n -кратная свертка функции $S(f)$;

$S(f)$: нормализованная спектральная плотность фазы сигнала:

$$S(f) = \frac{f_m P(f/f_m)}{2f^2(1-\varepsilon)}, \quad (31)$$

где ε — отношение нижней частоты к верхней в основной полосе полезного сигнала.

Характеристики предискажения МККР хорошо аппроксимируются с помощью выражения:

$$P(f/f_m) = 0,4 + 1,35 \left(\frac{f}{f_m} \right)^2 + 0,75 \left(\frac{f}{f_m} \right)^4, \quad \text{если } \varepsilon \leq \frac{f}{f_m} \leq 1. \quad (32)$$

Здесь

$$a = R_s(0) - R_s(\infty) \simeq \frac{m^2}{\varepsilon} (0,4 + 1,6 \varepsilon + 0,25 \varepsilon^2 + 0,25 \varepsilon^3) \approx \frac{m^2}{\varepsilon} (0,4 + 1,6 \varepsilon), \quad (33)$$

где $R_s(\tau)$ — функция автокорреляции $S(f)$.

Нормализованная мощность остатка несущей сигнала выражается в виде e^{-a} .

Если $m > 1$:

$$\begin{aligned} P(f) &= \frac{1}{f_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2}{2f_s^2}} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n \frac{C_{2n}}{m^{2n} 2^n} H_{2n} \left(\frac{f}{f_s \sqrt{2}} \right) \right\} \approx \\ &\approx \frac{1}{f_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2}{2f_s^2}} \left\{ 1 + \frac{6,375 \cdot 10^{-2}}{m^2} H_4^* \left(\frac{f}{f_s \sqrt{2}} \right) - \frac{7,416 \cdot 10^{-3}}{m^4} H_6^* \left(\frac{f}{f_s \sqrt{2}} \right) + \right. \\ &\left. + \left(\frac{2,37 \cdot 10^{-2}}{m^4} + \frac{7,16 \cdot 10^{-4}}{m^6} \right) H_8^* \left(\frac{f}{f_s \sqrt{2}} \right) - \left(\frac{9,929 \cdot 10^{-3}}{m^6} + \frac{5,854 \cdot 10^{-5}}{m^8} \right) H_{10}^* \left(\frac{f}{f_s \sqrt{2}} \right) \right\}. \quad (34) \end{aligned}$$

* Хотя сумма в формуле (30) охватывает все значения параметров системы, она не всегда предоставляет наиболее удобный алгоритм для численных расчетов, особенно в тех случаях, когда велики нормализованная среднеквадратичная многоканальная фаза и/или девиация частоты (соответственно, a и m).

где

f_s : среднеквадратичная девиация частоты многоканальным сигналом.

$H_{2n}^*(x) = (-1)^n \frac{n!}{(2n)!} H_{2n}(x)$: нормализованный полином Эрмита.

На рис. 18а—18е изображены графики спектров, составленные в соответствии с формулами (30) и (34) для индексов модуляции m , принятых в типичных радиорелейных системах и системах спутниковой связи.

Кривые дают приближенные значения в той области, где значения f/f_m близки к 0 и 1. Точные значения зависят от конкретных значений ε . Точные кривые для нескольких значений ε приведены [МККР, 1982—86а] на рис. 18f—18j при f/f_m , близком к нулю. (Внутренние кривые на рис. 18d—18е также достаточно точные при f/f_m , близком к нулю, если ε равно или больше 0,02.)

Для индексов модуляции больше 1,1 была найдена следующая эмпирическая формула, которая хорошо совпадает с кривыми, изображающими $P(f)$, и представляет собой более приближенное выражение уравнения (34):

$$f_m \cdot P(f) = \frac{1}{m \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2m^2(1+0,01337x^2 \cdot m^{-3,367})}}, \quad (34a)$$

где

$$x = f/f_m.$$

Эта эмпирическая формула представляет собой приспособление гауссовой формулы для больших индексов модуляции. Для таких индексов см. [Pontano и др., 1973].

Вопросы, связанные с практической оценкой ЧМ спектров, рассматриваются в [Middleton, 1951; Stewart, 1954; Medhurst и др., 1958; Medhurst, 1960; Ferris, 1968; Бородич, 1976; МККР, 1978-82b].

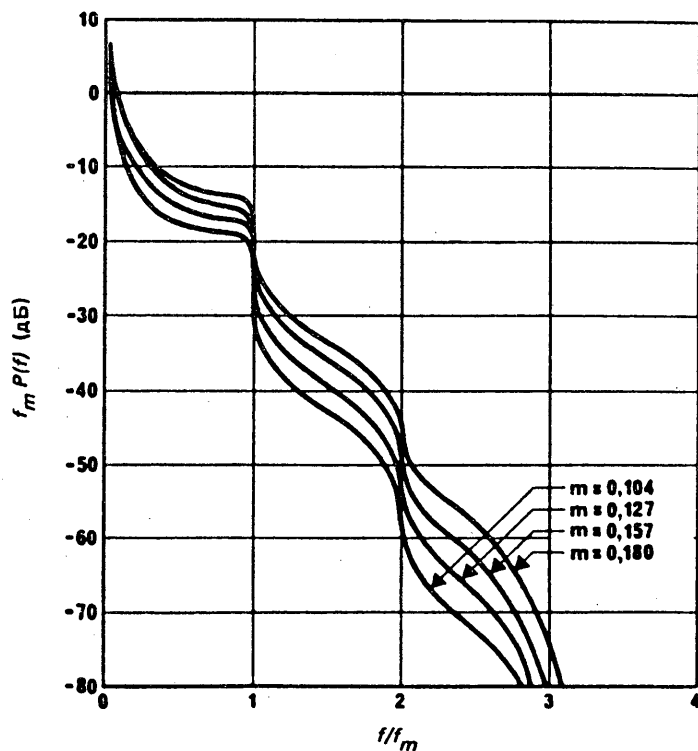


РИСУНОК 18а — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции

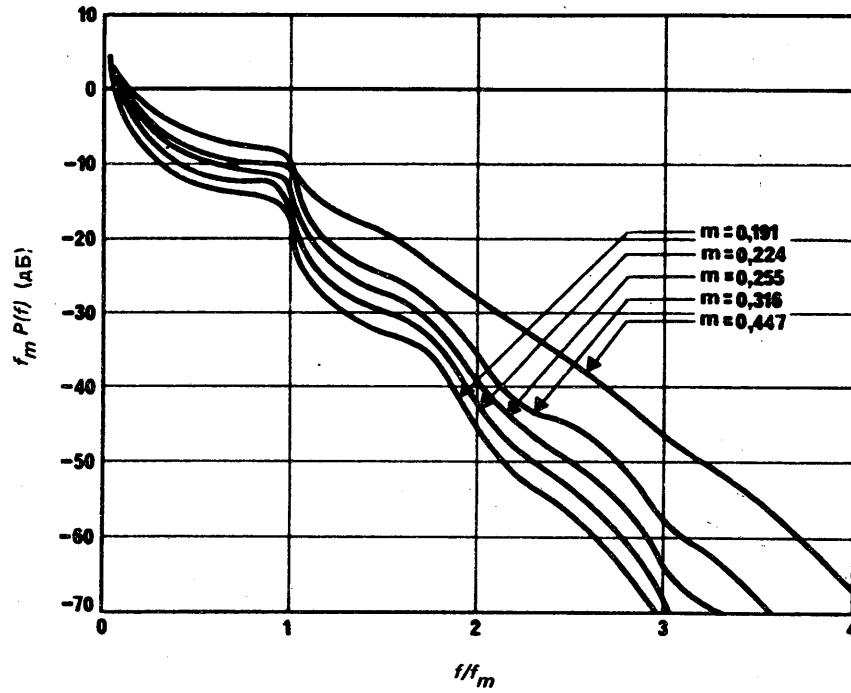


РИСУНОК 18b — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции

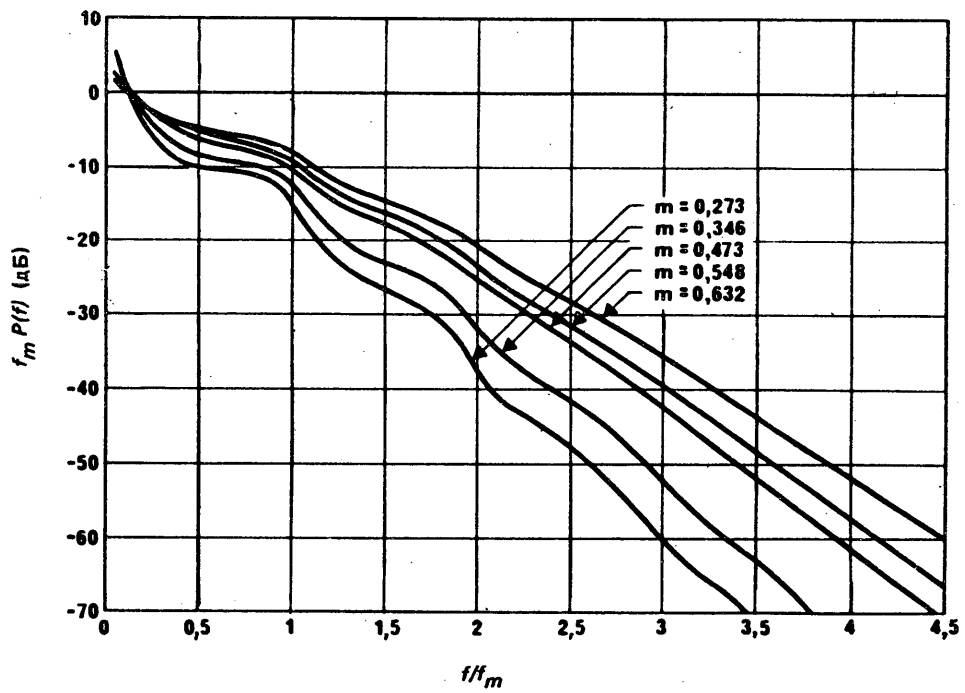


РИСУНОК 18с — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции

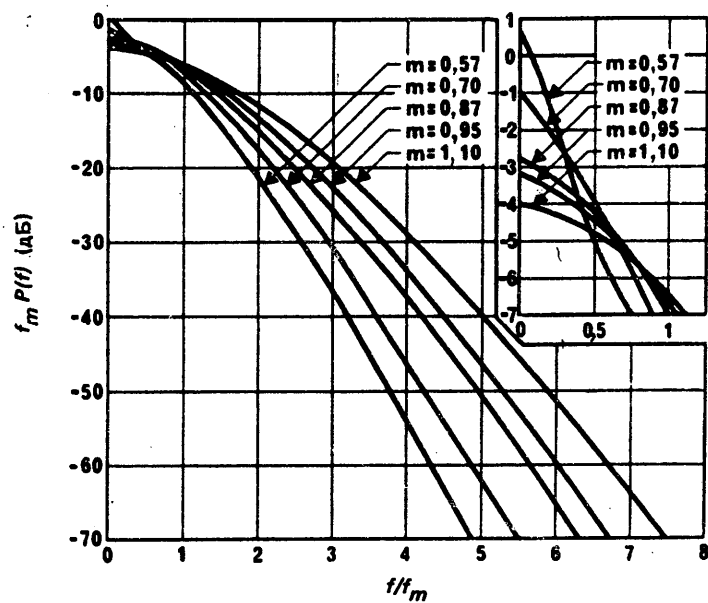


РИСУНОК 18d — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции

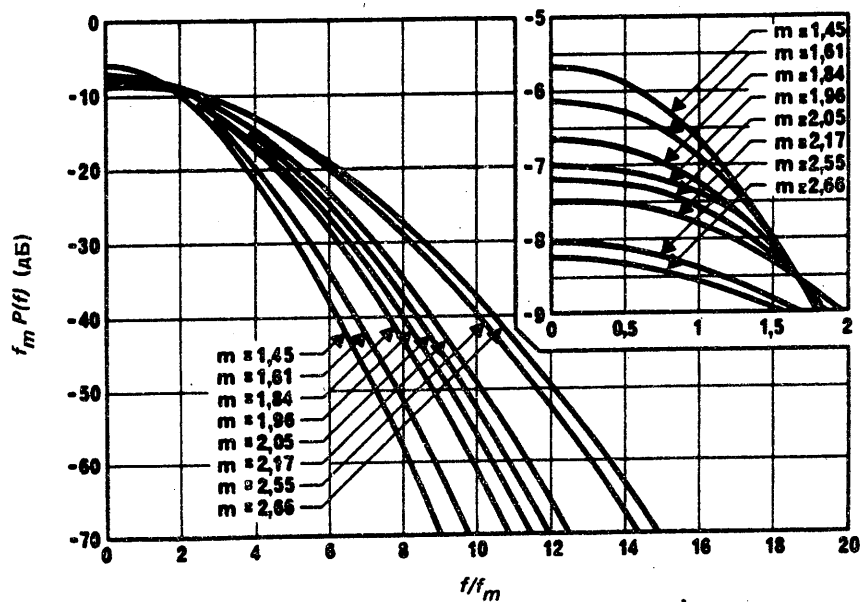


РИСУНОК 18е — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции

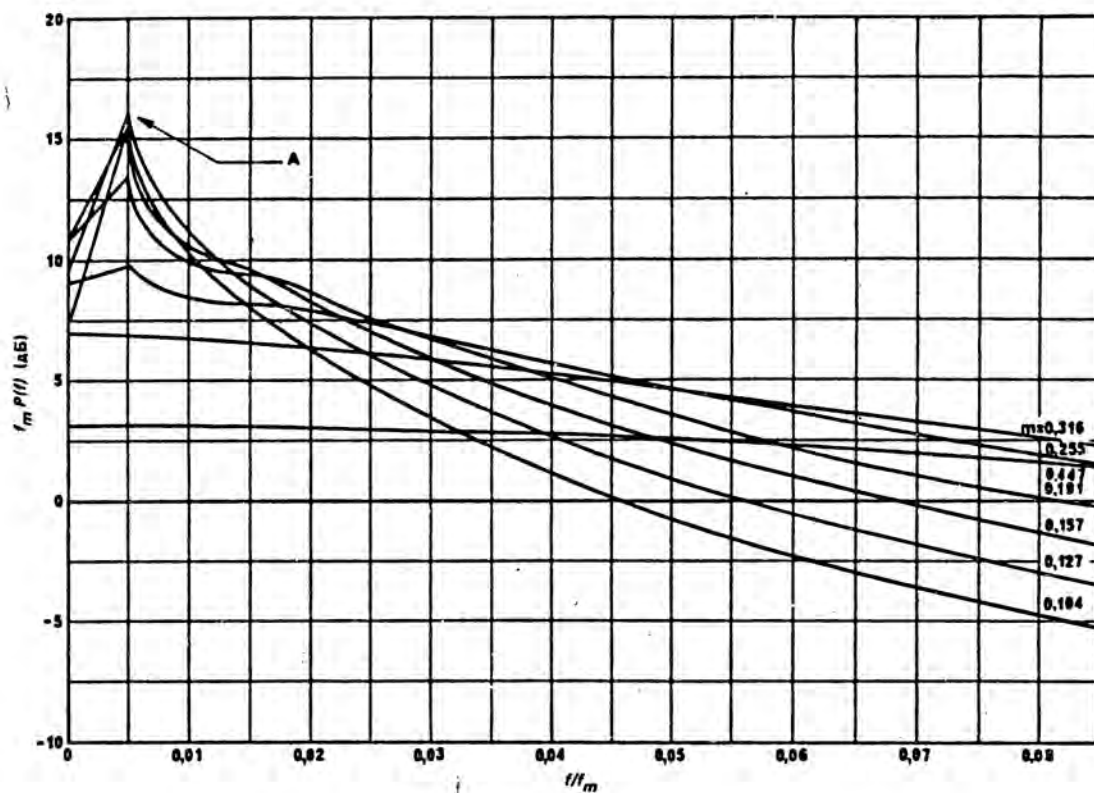


РИСУНОК 18f — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции и для $\varepsilon = 0.005$

А: Пиковые значения в дБ равняются 15,9; 15,9; 15,2; 13,6; 9,8; 7,1; 3,2 для $m = 0.104—0.447$, соответственно

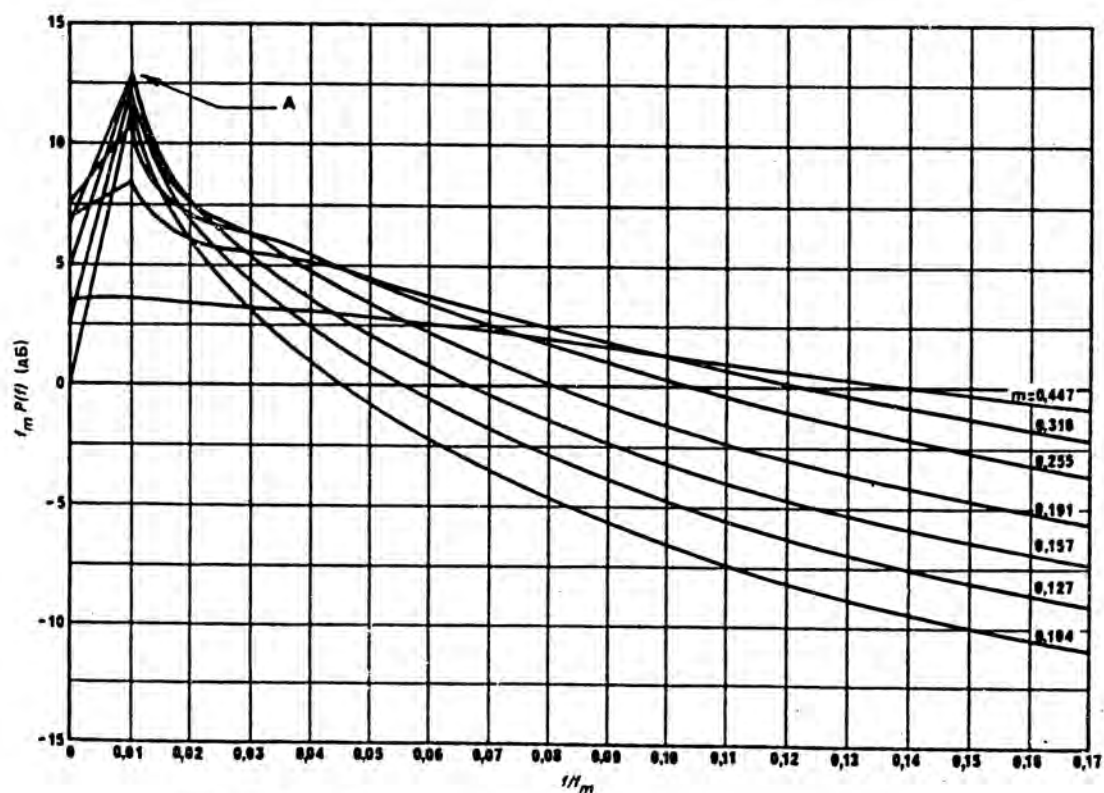


РИСУНОК 18g — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции и для $\varepsilon = 0.01$

А: Пиковые значения в дБ равняются 11,6; 12,4; 12,9; 12,8; 10,9; 8,3; 3,5 для $m = 0.104—0.447$, соответственно

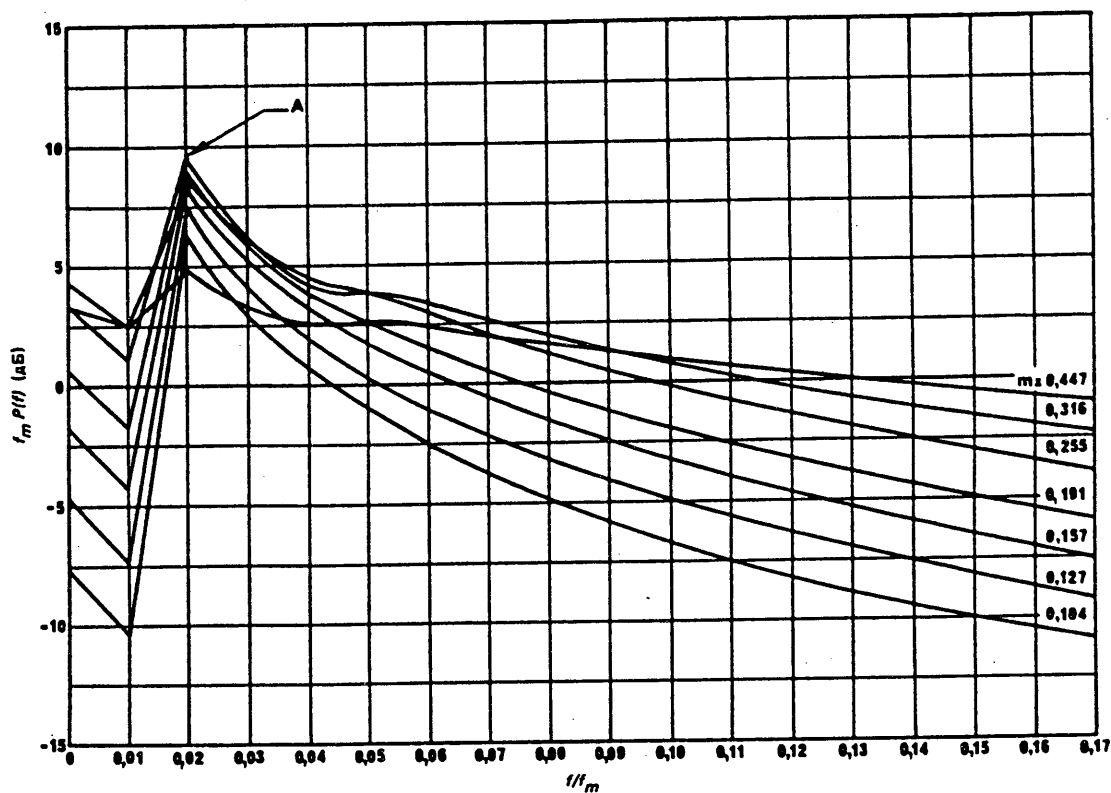


РИСУНОК 18h — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции и для $\epsilon = 0,02$

А: Пиковые значения в дБ равняются 6,5; 7,7; 8,8; 9,5; 9,6; 8,7; 4,8 для $m = 0,104-0,447$, соответственно

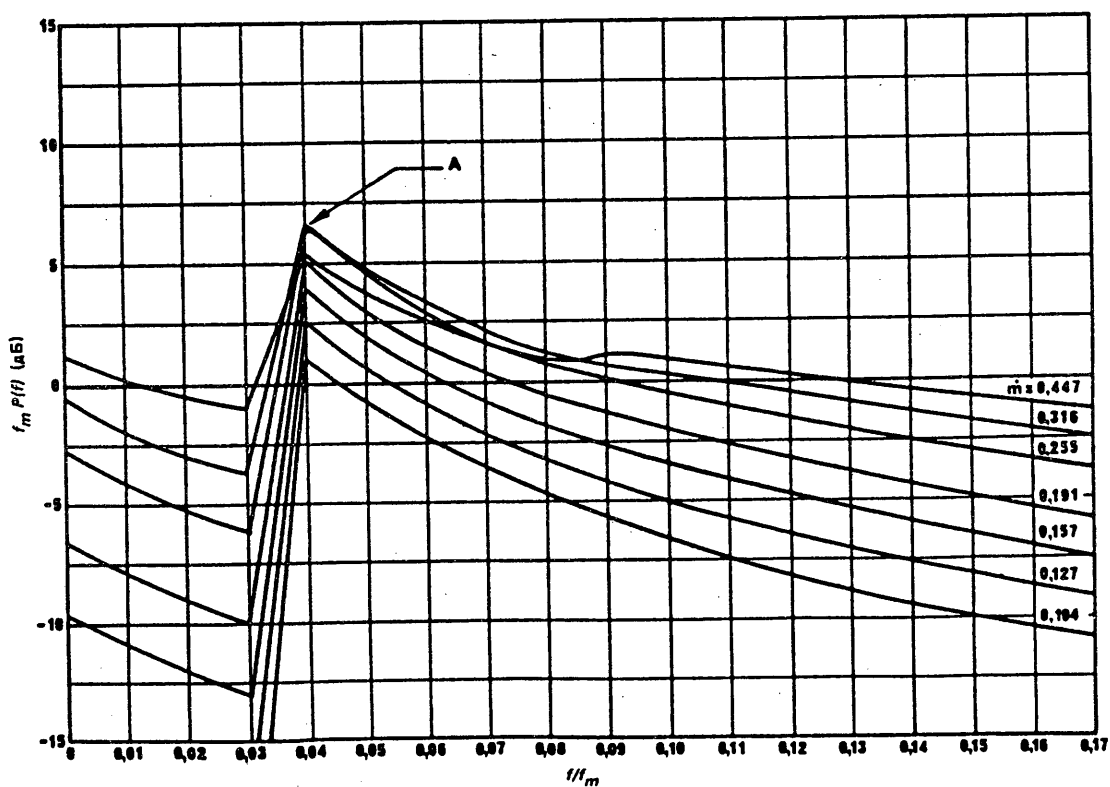


РИСУНОК 18i — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции и для $\epsilon = 0,04$

А: Пиковые значения в дБ равняются 1,0; 2,5; 3,9; 5,1; 6,3; 6,5; 5,2 для $m = 0,104-0,447$, соответственно

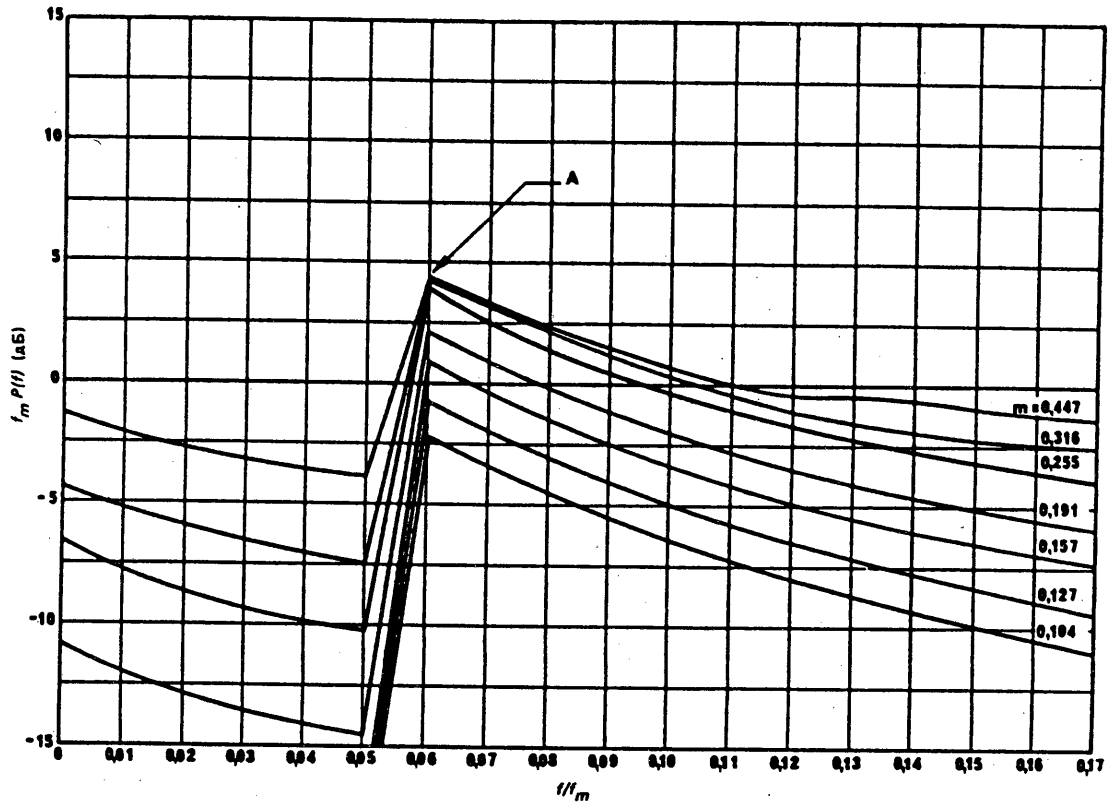


РИСУНОК 18] — Нормализованные спектральные плотности мощности для различных индексов модуляции и для $\varepsilon = 0,06$

А: Пиковые значения в дБ равняются -2,3; -0,7; 0,9; 2,2; 3,7; 4,4; 4,3 для $m = 0,104-0,447$, соответственно

3.2 Телефонная система вида один канал на несущей с ЧМ

Требуются дальнейшие исследования.

3.3 Цифровой сигнал с модуляцией типа ФМ, КАМ и СРМ

Нормализованная спектральная плотность мощности сигнала, центрированная на несущей частоте, выражается следующим образом (Chen, 1981; Austin и др., 1982; Le-Ngoc и др., 1982):

$$P(f) = T_s \frac{\sin^2 (\pi f T_s)}{(\pi f T_s)^2} \quad (35a)$$

для M -уровневых ФМ и КАМ;

$$P(f) = 4T_s \left\{ \frac{1 + \cos (2 \pi f T_s)}{\pi^2 [1 - (4 f^2 T_s^2)]^2} \right\} \quad (35b)$$

для MSK;

$$P(f) = 2T_s \left[\frac{\sin (\pi f T_s)}{(\pi f T_s)} \right]^2 \left[\frac{\cos (\pi f T_s)}{1 - (4 f^2 T_s^2)} \right]^2 \quad (35c)$$

для квадратурной модуляции с перекрывающимися импульсами типа приподнятого косинуса;

$$P(f) = \frac{\sin^2 2 \pi f T_s}{2 \pi^2 f^2 T_s (1 - 4 f^2 T_s^2)^2} \quad (35d)$$

для IJF-OQPSK.

3.4 Частотно-модулированный телевизионный сигнал (ТВ-ЧМ)

Изучив спектр, принимаем следующее выражение для верхнего предела нормализованной спектральной плотности мощности сигнала, центрированной на несущей частоте:

$$P(f) = \text{Sup} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta F} \exp \left[- \left(\frac{f}{\Delta F} \right)^2 \right], g_i(f) \right\}, \quad (36)$$

где i может принимать три различных значения ($\text{Sup} (x, y)$ обозначает наибольшую из двух функций x и y). В свою очередь, изучаются помехи, полученные для каждого из этих значений, и принимается наивысший уровень помех.

Измерения, проведенные во Франции [МККР, 1982-86b], показали, что $P(f)$ ТВ-ЧМ сигнала с дисперсией более точно определяется с помощью следующей формулы:

$$P(f) = \text{Sup} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta F} \exp \left[- \left(\frac{f}{\Delta F} \right)^2 \right], g_i(f) \right\}. \quad (36a)$$

При определении допустимого уровня помех от ТВ-ЧМ сигнала с дисперсией для 20% времени можно допустить, что это значение будет на 10 дБ ниже значения, вычисленного по формуле (36а).

Первая часть выражения, заключенная в квадратные скобки, представляет собой «непрерывный фон» спектра, который является гауссовым; Δf имеет значения, приведенные в § 2.3, а f — частота (в МГц). Вторая часть $g_i(f)$ представляет собой «центральную» часть спектра, которая существенно связана со строками, соответствующими «черному» и «белому». Если Δf — девиация частоты дисперсии энергии, то $g_i(f)$ имеет значения, указанные на рис. 3 для $i = 1, 2$ и 3. Эти значения соответственно относятся к тому случаю, когда мы имеем однородное изображение («черное» или «белое»), очень контрастное (обычно испытательная таблица «полоса в полстроки») и не очень контрастное (обычно испытательная таблица в виде «лестницы»). В этих моделях не учитывалось влияние строки синхронизации и цветовой поднесущей, так как эти строки менее важны с точки зрения мощности, чем те строки, которые учитываются в этих моделях.

Однако модель, соответствующая $i = 1$, может использоваться только тогда, когда она предполагает наличие модулятора, связанного по переменному току; в этом случае спектр остается центрированным на номинальной частоте для черного (или белого) изображения. Однако если используется модулятор, связанный по постоянному току, то номинальная частота во всех случаях соответствует среднесерому изображению; функция $g_i(f)$ должна быть тогда центрирована на частоте, разнесенной на $\pm \Delta f/3$ от номинальной частоты.

3.5 Амплитудно-модулированный телефонный сигнал

Если $f_{\min}$ и $f_{\max}$ представляют собой нижние и верхние частоты модулирующего сигнала, то нормализованная спектральная плотность мощности равняется

$$P(f) = \begin{cases} \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} & \text{(для системы с одной боковой полосой} \\ & \text{с подавленной несущей)} \\ \frac{1}{2(f_{\max} - f_{\min})} & \text{(для двухполосной системы с подав-} \\ & \text{ленной несущей)} \end{cases} \quad (37)$$

внутри полосы частот сигнала, а вне полосы равняется нулю.

4. Неспектральные влияния помех — линейный канал

Кроме спектрального влияния помех необходимо рассмотреть влияния, которые не могут быть предсказаны на основе спектральных плотностей мощностей. Различные ухудшения, вызываемые помехами, требуют изучения характеристик, связанных со временем. Примеры таких ухудшений:

- импульсный шум в системах связи с ЧРК-ЧМ может возникать в результате воздействия ЧМ помехи от соседнего канала [Wachs, 1970]. В этом случае сигнал ЧРК-ЧМ в соседней полосе частот при отклонениях частоты будет временами попадать в полосу пропускания полезного сигнала. Если отношение мощностей помехи и полезного сигнала и статистика девиации частоты по времени будут неподходящими, то в результате возникнет импульсный шум или щелчки;
- помеха телевизионной передаче может быть создана сигналом импульсной передачи, например МДВР. В этом случае огибающая мешающего сигнала может иметь частотные компоненты, к которым чувствителен видеосигнал. Можно ожидать, что частоты вблизи строчных или кадровых частот будут создавать субъективно воспринимаемые ухудшения;
- влияния помех могут быть результатом воздействия большого сигнала, модулированного только сигналом дисперсии энергии, когда мгновенная частота проходит через узкую полосу пропускания полезного сигнала, например в системах с одним каналом на несущей (ОКН). В такой ситуации создаются переходные эффекты, связанные с коэффициентом скважности помехи и частотой свипирования.

Этот перечень примеров неполный и предназначен для иллюстрации некоторых механизмов помех, зависящих от времени.

Другое неспектральное влияние в отношении характеристики помех зависит от метода демодуляции. В зависимости от природы помехи может быть предпочтителен тот или иной метод демодуляции. Например, импульсный шум, наводимый соседним каналом в широкополосной ЧМ системе, может быть уменьшен путем использования соответствующим образом сконструированного демодулятора либо с фазовой автоподстройкой, либо с обратной связью по частоте [Bergman и др., 1972]. При приеме цифровых сигналов различные методы восстановления несущей и тактовой синхронизации будут обладать различной чувствительностью к определенным видам помех.

5. Эффекты нелинейных каналов

5.1 Общие положения

Большинство спутниковых каналов передачи, которые используются в настоящее время, обладают свойствами нелинейной передачи, обусловленными применяемым оборудованием для ретранслятора и земной станции. В ретрансляторе существует нелинейное соотношение между амплитудой сигнала на входе и выходе (АМ-АМ), кроме того, функция перехода фазы соотносится с амплитудой сигнала на входе (АМ-ФМ преобразование). Эти характеристики являются одной из причин чувствительности к помехе данной системы связи. При наличии как полезного, так и мешающего сигналов на входе нелинейного устройства создается мультипликативное (неаддитивное) ухудшение качества передачи. В зависимости от используемого метода модуляции это ухудшение будет проявляться в характеристиках основной полосы.

5.2 Аналоговый телефонный полезный сигнал ЧРК-ЧМ

При рассмотрении помех аналоговым ЧМ сигналам необходимо исследовать два аспекта [Вегман и др., 1972]. Наличие полезного сигнала и мешающего(щих) сигнала(ов) на входе нелинейного устройства приведет к образованию интермодуляционных спектральных компонентов. Затем эти компоненты могут выявиться в виде дополнительных мешающих сигналов. Вторым аспектом исследования является тот случай, когда сочетание полезного и мешающего сигналов на входе приводит к амплитудной модуляции; эта модуляция в процессе преобразования АМ-ФМ преобразуется в фазовую модуляцию. Фазовая модуляция полезного сигнала вызывает ухудшение в основной полосе при оконечной демодуляции в приемнике.

Помеха в основной полосе может образовываться из-за неполного подавления амплитудной модуляции полезного сигнала ограничителем приемника или ЧМ сигнал в соседнем канале может быть модулирован по амплитуде на скате характеристики фильтра полезного сигнала; эта АМ преобразуется в ФМ и таким образом появляется в основной полосе. Обычно источником такого вида помех является нелинейность усилителей мощности и демодуляторов [Бородич, 1976].

Нелинейная помеха может оказывать сильное субъективное воздействие, так как она может проявляться в виде непосредственного переходного влияния. Более того, она может ухудшить пороговые свойства приемника; это воздействие имеет особое значение при приеме сигналов со спутника, когда уровень полезного сигнала обычно близок к пороговому и помеха от соседнего канала может создать вспышку порогового шума.

В том случае, когда оказывается, что более обычные линейные механизмы помех, рассматривавшиеся в данном Отчете, создают незначительные помехи, нелинейные механизмы требуют исследования. Для расчета этих помех необходимы сведения о конкретных приемниках, фильтрах и коэффициенте преобразования АМ-ФМ [Кантор и др., 1971].

При исследовании и анализе систем МДЧР-ЧМ передачи многоканальной телефонии для расчета помех в индивидуальных каналах необходимо учитывать следующие источники помех:

- нелинейность реального ограничителя;
- нелинейность реального частотного детектора;
- пороговые эффекты ЧМ приемника (с учетом индекса модуляции помехи);
- преобразование АМ-ФМ в РЧ канале.

Разными авторами даны аналитические выражения для необходимых расчетов и более подробное описание метода [Дорофеев, 1972; Кантор и Мустафиди, 1973; Мустафиди и Юлин, 1974 и 1975].

5.3 Цифровой ФМ полезный сигнал

Трактовка помех цифровым ФМ сигналам более сложна, чем в случае аналоговых сигналов. Фильтрация ФМ сигнала с целью снижения требований к ширине полосы приводит к значительной амплитудной модуляции огибающей на частотах, связанных со скоростью передачи символов. Эта модуляция, будучи преобразованной в фазовую модуляцию с помощью механизма преобразования АМ-ФМ, снижает помехозащищенность данной системы. Отдельно необходимо рассмотреть функцию восстановления несущей и тактовой синхронизации системы. Можно предположить, что значительное влияние на помехозащищенность системы будут иметь характеристики модулятора и демодулятора, касающиеся фильтрации, методов восстановления несущей и тактовой синхронизации и методов дискретизации. В настоящее время нет аналитических выражений для расчета воздействия помех на ФМ сигналы, передаваемые по нелинейному каналу. Были представлены лабораторные измерения различных конкретных систем, которыми можно руководствоваться [Wachs и Weinreich, 1975; Weinreich и Wachs, 1976].

6. Измерения помех цифровым системам

В [МККР, 1963-66] содержатся подробные сведения об исследовании, проверенном испытаниями, которые проводились в Японии. Результаты показывают, что возможно значительное уменьшение помех от систем с угловой модуляцией системам с импульсно-кодовой модуляцией, использующим фазовую манипуляцию, по сравнению с помехами, возникающими между двумя системами с угловой модуляцией.

Ограниченные испытания, проведенные во Франции [МККР, 1970-74b], также продемонстрировали соответствие между теоретическими и измеренными данными.

Эксперименты, проведенные в целях выяснения влияния ФМ помехи и шума на демодуляторы ФМ сигналов [МККР, 1982-86с], дают возможность определить пригодность гауссовой аппроксимации для оценки влияния ФМ помех. На рис. 19 показан коэффициент ошибок когерентного 4-ФМ демодулятора в зависимости от отношения энергия/на бит к плотности шума для двух фиксированных отношений C/I , 10 и 13 дБ, и для различных отношений между скоростями передачи по каналу помехи R_i и сигнала R_s ($R_i/R_s = 0; 0,5; 1; 2; 5$). Отношение сигнала к помехе было установлено на выходе приемного фильтра демодулятора с шириной полосы частот, превышающей в 1,1 раза ширину полосы Найквиста. На рис. 20 показан коэффициент ошибок в зависимости от отношения R_i/R_s для фиксированного отношения сигнала к шуму $(C/N) = 13$ дБ и для трех значений отношения C/I ($C/I = C/N$, $C/I = C/N + 2$ дБ, $C/I = C/N - 2$ дБ). На рис. 21 показано соотношение при использовании в канале полезного сигнала сверточного кода кодек при $\gamma = 1/2$ для кодовой скорости с декодированием Витерби.

Изучение полученных результатов показывает, что представление ФМ помехи в совпадающем канале в виде гауссова шума является правильным для $R_i > (4-5) R_s$, и это применимо как к обычным каналам, так и к системам, использующим кодирование, хотя в последнем случае характер изменения коэффициента ошибок будет немонотонным. В области значений уровней помех, соизмеримых с уровнем теплового шума, широкополосная ФМ помеха вызывает увеличение коэффициента ошибок примерно на порядок величины по сравнению с немодулированной помехой того же уровня, что эквивалентно разности в их уровнях до 3—4 дБ при постоянном коэффициенте ошибок. Следует также заметить, что 2-ФМ помеха создает более ощутимое воздействие на коэффициент ошибок, чем 4-ФМ помеха.

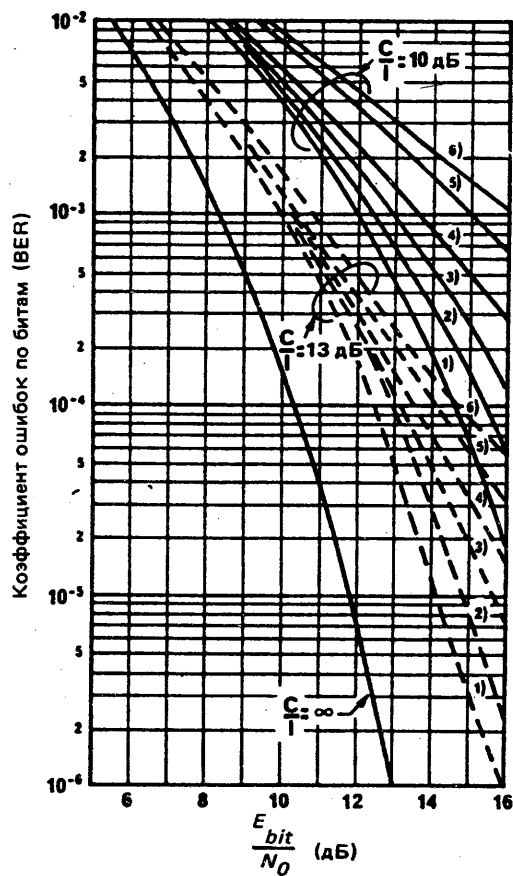


РИСУНОК 19 — Коэффициент ошибок в зависимости от отношения энергии сигнала на бит к плотности шума ($\frac{E_{bit}}{N_0}$) и от отношения сигнала к помехе ($\frac{C}{I}$)

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1) $\frac{R_i}{R_s} = 0$ | 4) $\frac{R_i}{R_s} = 2$ |
| 2) $\frac{R_i}{R_s} = 1/2$ | 5) $\frac{R_i}{R_s} = 5$ |
| 3) $\frac{R_i}{R_s} = 1$ | 6) помеха в виде шума |

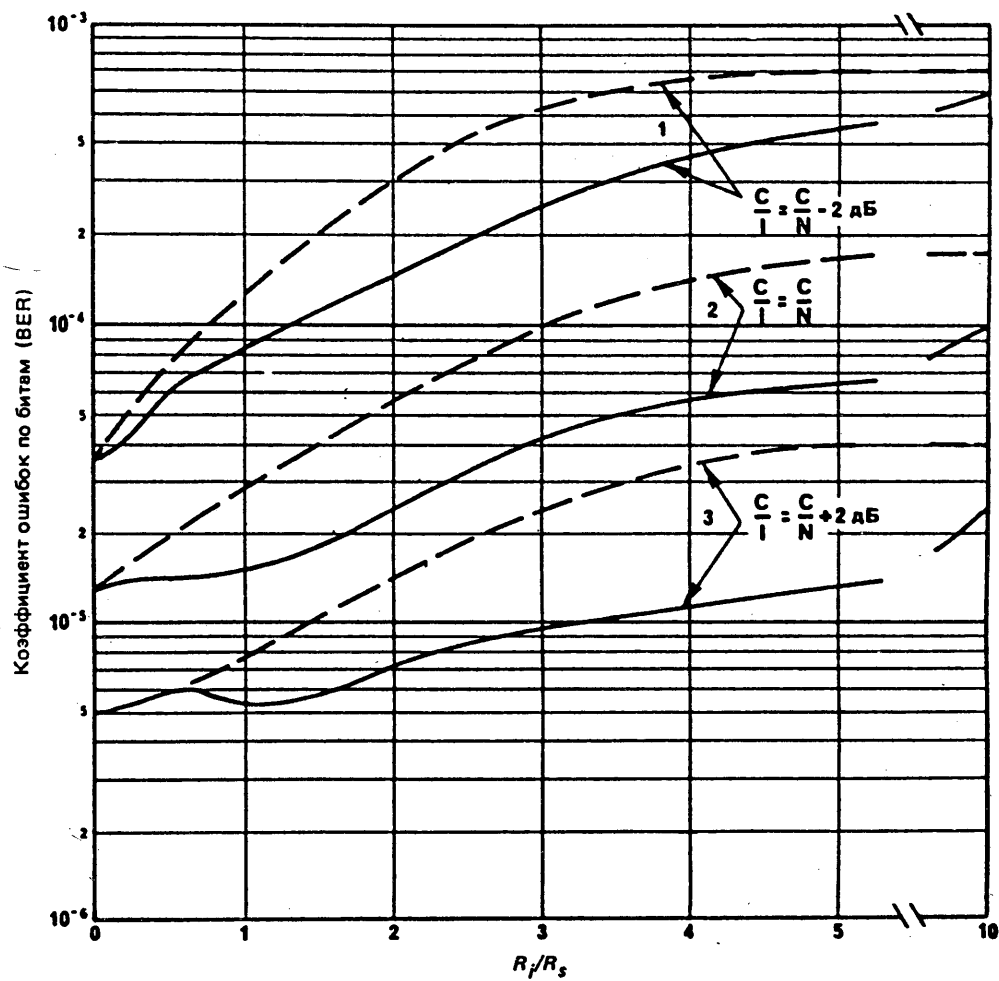


РИСУНОК 20 — Кoeffициент ошибок 4-ФМ когерентного демодулятора в зависимости от отношения скорости передачи помехи и сигнала R_1/R_s

--- 2-ФМ помеха
 — 4-ФМ помеха

$$\frac{C}{N} = 13 \text{ дБ}$$

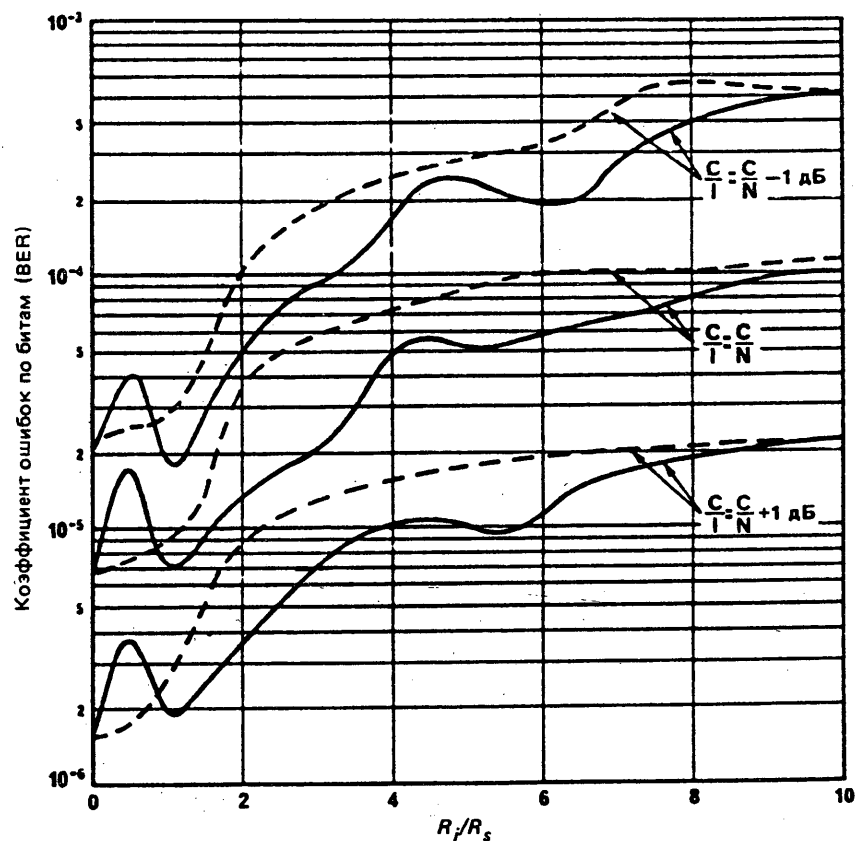


РИСУНОК 21 — Коэффициент ошибок на выходе декодера сверточного кода в зависимости от отношения скоростей передачи помехи и сигнала R_i/R_s

--- 2-ФМ
 — 4-ФМ

$$\frac{C}{N} = 9 \text{ дБ}$$

ССЫЛКИ

- ANDERSON, R. R. and SALZ, J. [July—August 1965] Spectra of digital FM. *BSTJ*, Vol. 44, 6, 1165—1189.
- AUSTIN, M. C. and CHANG, M. U. [March 1981] Quadrature raised-cosine modulation. *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. COM-29, 3, 237—249.
- BENEDETTO, S., BIGLIERI, E. and CASTELLANI, B. Combined effects of intersymbol, interchannel and co-channel interferences in M-ary CPSK systems. *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. COM-21, 9, 997—1008, September 1973.

- BERMAN, A.L., MAHLE, C. and WACHS, M. R. [1972] The INTELSAT-IV communications system, transmission modelling. *COMSAT Technical Rev.*, Vol. 2, 2, 489—527.
- БОРОДИЧ С. В. [1976] Искажение и помехи в многоканальных системах радиосвязи с частотной модуляцией. Издательство «Связь», Москва, СССР.
- БОРОДИЧ С. В. [1983] Упрощенная методика расчета помех между сетями фиксированной спутниковой службы при их координации. *Электросвязь*, 1, 14—17.
- CHEN, R. [1980] Radio frequency interference noise in FDM-FM radio-relay systems. *Review of the Research Institute of Posts and Telecommunications*, Beijing, 1, 86—102.
- CHEN, R. [November 1981] Signal design and the choice of transmission type for SCPC satellite communication systems. Internal Report, Communication Satellite Planning Centre, Stanford University.
- CHEN, R. and LUSIGNAN, B. B. [June 1983] Interference performance analysis of M-ary CPSK and M-ary CAPK digital transmission systems and the computation of 'Required isolation' for efficient utilization of geostationary satellite orbit/spectrum. *IEEE ICC Conference Record*, Vol. 3, F1.3.1—F1.3.5, Boston.
- CHEN, R. [August 1986] Performance consideration of multi-level QAM system with additive noise, interference and distortion. Eighth Colloquium on Microwave Communication, 181—182, Budapest.
- DAVIES, M. C. [May 1972] The effect of interchannel interference on the performance of a phase-modulation digital system. Paper 24, AGARD-CP-103, AGARD Conference on Aerospace Telecommunications Systems, London, UK.
- ДОРОФЕЕВ В. М. [1972] Пороговые свойства приемника ЧМ. *Радиотехника*, том 27, 6, 26—31.
- DUPRAZ, J. [December 1967] Les largeurs spectrales des liaisons de télémesure PMC. *L'Onde électrique*, Vol. 47, 489, 1379—1402.
- FERRIS, C. C. [April 1968] Spectral characteristics of FDM-FM signals. *IEEE Trans. Comm. Techn.*, Vol. COM-16, 2, 233—238.
- JEFFERIS, A. K. [May 1973] Spectral-energy dispersal in digital communication-satellite systems. *Proc. IEE*, Vol. 120, 5, 529—532.
- JOHNS, P. B. [March 1966a] Graphical method for the determination of interference transfer factors between interfering FM multi-channel telephony systems. *Electron. Lett.*, Vol. 2, 3.
- JOHNS, P. B. [May 1966b] Interference between terrestrial radio-relay systems and communication satellite systems. *Electron. Lett.*, Vol. 2, 5.
- КАНТОР Л. Я., ДЬЯЧКОВА М. Н. и ДОРОФЕЕВ В. М. [1971] Влияние радиопомех на приемник ЧМ сигналов. *Электросвязь*, 6, Москва, СССР.
- КАНТОР Л. Я. и МУСТАФИДИ К. П. [1973] К выбору параметров систем спутниковой связи с ЧМ и частотным разделением. *Труды НИИР*, 4, Москва, СССР.
- LE-NGOC, T., et al. [1982] Spectral properties of IJF-OQPSK and PR-IJF-OQPSK signals. *IEEE ICC*, 3B.3.1—3B.3.4.
- MEDHURST, R. G. [May 1960] RF spectra of waves frequency modulated with white noise. *Proc. IEE*, Vol. 107, Part C, 12, 314—323.
- MEDHURST, R. G. [March 1962] FM interfering carrier distortion: general formula. *Proc. IEE*, Vol. 109, Part B, 44, 149—150.
- MEDHURST, R. G., HICKS, E. M. and GROSSETT, W. [May 1958] Distortion in frequency division multiplex FM systems due to an interfering carrier. *Proc. IEE*, Vol. 105, Part B, 21, 282—292.
- MEDHURST, R. G. and ROBERTS, J. H. [March 1964] Expected interference levels due to interactions between line-of-sight radio-relay systems and broadband satellite systems. *Proc. IEE*, Vol. 111, 3, 519—523.
- MIDDLETON, D. [July 1951] The distribution of energy in randomly modulated waves. *Phil. Mag.* Vol. 42, 7, 689—707.
- МУСТАФИДИ К. П. и ЮЛИН Б. И. [1974] Помехоустойчивость ЧМ приемника при действии шума и гармонических помех. *Труды НИИР*, 2, Москва, СССР.
- МУСТАФИДИ К. П. и ЮЛИН Б. И. [1975] Влияние модуляции помех по соседнему каналу на порог ЧМ приемника. *Труды НИИР*, 4, Москва, СССР.
- PONTANO, B. A., FUENZALIDA, J. C. and CHITRE, N. K. M. [June 1973] Interference and angle-modulated systems carrying multi-channel telephony signals. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-21, 6, 714—727.
- POSTL, W. [March 1963] Die spektrale Leistungsdichte bei Frequenzmodulation eines Trägers mit einem stochastischen Telegraphiesignal (Spectral power density with frequency-modulation of a carrier with a stochastic telegraph signal). *Frequenz*, 17, 107—110.

- PRABHU, V. K. and ENLOE, L. H. [September 1969] Interchannel interference considerations in angle-modulated systems. *BSTJ*, Vol. 48, 7, 2333—2358.
- PRASANNA, S., SHARP, G. and DAS, S. [July 1977] Interference between FM carriers and a digitally-modulated SCPC circuit. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems*, Vol. AES-13, 4, 427—429.
- ROSENBAUM, A. S. [February 1969] PSK error performance with Gaussian noise and interference. *BSTJ*, Vol. 48, 2, 413—442.
- ROSENBAUM, A. S. [June 1970] Binary PSK error probabilities and multiple co-channel interferences. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-18, 3, 241—253.
- ROSENBAUM, A. S. and GLAVE, F. E. [January 1974] An error probability upper bound for coherent phase shift keying with peak-limited interference. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-22, 1, 6—16.
- STEWART, J. L. [October 1954] The power spectrum of a carrier frequency modulated by Gaussian noise. *Proc. IRE*, Vol. 42, 10, 1539—1542.
- WACHS, M. R. [June 1970] Analysis of adjacent channel interference in a multicarrier FM communications system. *IEEE International Conference on Communications (ICC '70)*, 8—10 June, San Francisco, USA, Conf. Record, Vol. 2, Session 30: Satellite communication systems problems and solutions, 70-CP-339-COM, 30-8-30-41.
- WACHS, M. R. and WEINREICH, D. E. [1975] A laboratory study of the effects of C. W. interference on digital transmission over non-linear satellite channels. *Proc. 3rd International Conference on Digital Satellite Communications*, Kyoto, Japan.
- WEINREICH, D. E. and WACHS, M. R. [1976] A laboratory simulation of multiple unmodulated interference sources on digital satellite channels. *Proc. International Conference on Communications (ICC '76)*, Philadelphia, Pa, USA.
- Злотникова Е. А. и Дорофеев В. М. [1987] Оценка мешающего влияния ЧРК-ЧМ помехи на систему с фазовой манипуляцией. *Труды НИИР*, 1.

Документы МККР

- [1963-66]: IV/220 (Япония).
- [1966-69]: IV/11 (Канада).
- [1970-74]: а. 4/272 (СССР); б. 4/66 (Франция).
- [1978-82]: а. 4/16 (9/69) (США); б. 4/332 (9/294) (СССР).
- [1982-86]: а. 4/308 (9/312) (Канада); б. 4/116 (9/105) (Франция); с. 4/236 (9/269) (СССР);
- [1986-90]: а. 4/333 (9/358) (Китай); б. 4/316 (9/323) (Канада); с. 4/375 (9/382) (Бразилия); д. 4/275 (9/264) (Япония).

ЛИТЕРАТУРА

- PROAKIS, J. G. *Digital communications*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.
- TJENG, T. TJHUNG [August 1965] Power spectra and power distribution of random and binary FM signals with pre-modulation shaping. *Electron. Lett.*, 1, 176—178.

ОТЧЕТ 709-1

РАССМОТРЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ АНТЕННОЙ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ
И АНТЕННОЙ НАЗЕМНОЙ ЛИНИИ

(Вопрос 32/4 и Исследовательская Программа IC/4)

(1978—1982)

1. Введение

Для сохранения частотного спектра и возможного установления соединительной линии между земными станциями с разнесенным приемом может оказаться желательным использование одних и тех же полос частот для космических и наземных линий связи. Чтобы достичь этой цели без каких-либо частотных ограничений, необходимо, чтобы:

- антенна наземной станции была расположена в заднем секторе антенны земной станции;
- антенна наземной станции имела высокий коэффициент направленности.

Была выполнена программа измерений, результаты которой показывают хорошую корреляцию с выведенной формулой, позволяющей определить коэффициент связи в направлении основной оси. Была также осуществлена отдельная программа, показывающая возможность совместного расположения антенны наземной станции и антенны земной станции, использующих одну и ту же полосу частот в условиях нагрузки. При этом соблюдались следующие условия:

- наземная система осуществляет передачу при минимальной мощности в полосе приема земной станции;
- приемник наземной системы, расположенный на земной станции, работает в полосе передачи земной станции;
- между антенной земной станции и антенной наземной системы существует слабая связь;
- соотношение мощностей является критическим и может потребовать изменения параметров передачи в радиорелейной линии.

2. Коэффициент связи

С помощью геометрической теории дифракции была выведена относительно простая формула для оценки коэффициента связи между большой антенной земной станции и изотропной антенной, расположенной на обратном направлении ее фокальной оси. Были проведены измерения, и оказалось, что коэффициент связи может быть достаточно хорошо предсказан. На рис. 1 показана геометрия коэффициента связи, который выражается формулой

$$C = \frac{P_r}{P_t} = \frac{\lambda}{64\pi^2} G_0 \frac{1}{l^2} \frac{\cos^2 \varphi}{\sin^2 (\psi/2)} \quad (\theta = 0). \quad (1)$$

Углы, входящие в эту формулу, показаны на рис. 1, а G_0 является коэффициентом усиления облучатель/контррефлектор в направлении края основного зеркала. G_0 — довольно постоянная величина на большей части основного зеркала (особенно в системах Кассегрена со специальным профилем отражателя) и имеет значение, приблизительно выражаемое через $4\pi/\Omega^2$, где Ω — угол раскрытия зеркала. Однако G_0 очень быстро уменьшается непосредственно за краем основного зеркала вследствие влияния дифракции контррефлектора и диаграммы направленности облучателя антенны, и именно это уменьшенное значение должно использоваться в уравнении (1). Значение G_0 может обычно быть принято примерно на 12 дБ ниже значения $10 \log 4\pi/\Omega^2$ на номинальном направлении первой незаблокированной зоны для передачи на частоте 6 ГГц для больших антенн земных станций.

Формула для оценки коэффициента связи между большой антенной земной станции и изотропной антенной, расположенной в заднем секторе ее зеркала, может также быть выведена с использованием геометрической теории дифракции [МККР, 1978—82]. Результаты расчетов, в которых применялся этот метод, представлены на рис 2а, где видны потери связи для ряда значений угла θ и расстояний l .

На рис. 2б показаны измеренные коэффициенты связи между большой антенной и изотропной антенной.

Чтобы показать более практически концепцию использования одних и тех же полос частот для космических и наземных линий связи, была проведена дополнительная программа измерений. На рис. 3 показана связь между рупором со стандартным усилением и 30-метровой антенной в зависимости от угла поляризации и расстояния от антенны земной станции. Кроме того, была применена 12-километровая радиорелейная линия, чтобы продемонстрировать работу в совмещенном канале. Антенна земной станции имела круговую поляризацию, а антенна наземной радиорелейной линии — линейную поляризацию. Совместно расположенная трехметровая рупорная антенна, излучающая сигналы на частоте 4 ГГц, была размещена таким образом, чтобы ее апертура была видна для части края зеркала антенны земной станции. В результате такой геометрии образовалась относительно сильная связь; на практике большинство альтернативных расположений могли бы привести к уменьшению связи.

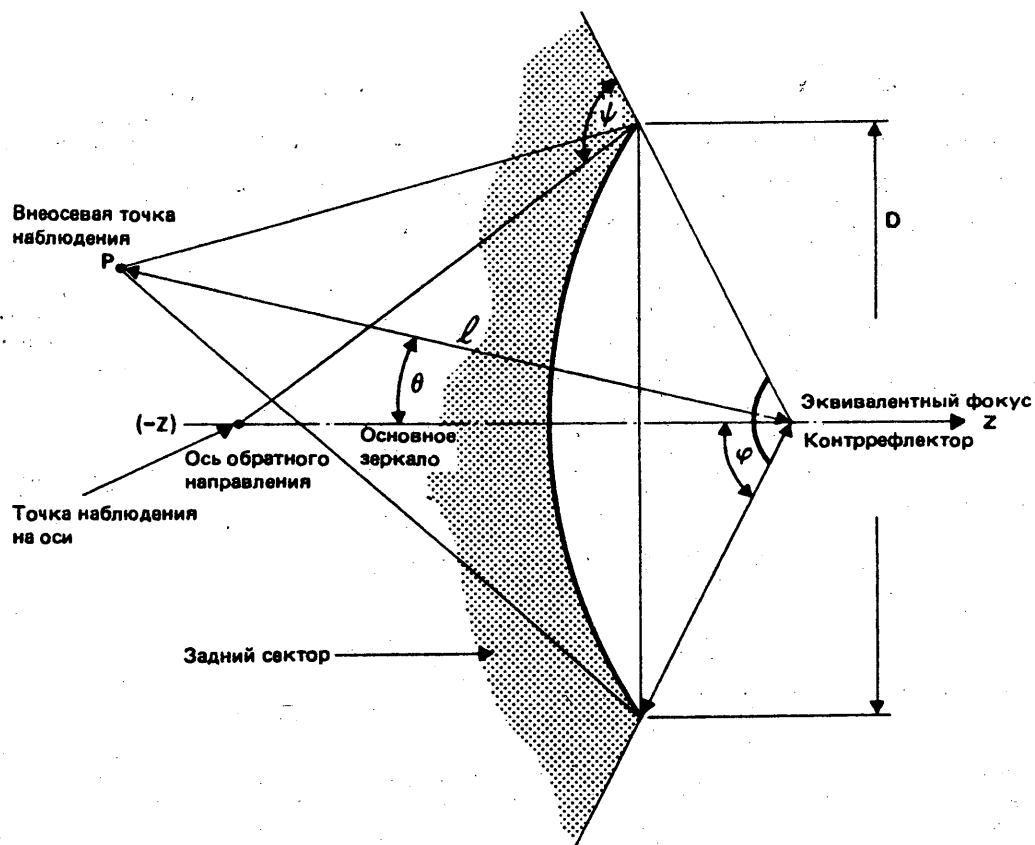


РИСУНОК 1 — Геометрия для расчета коэффициента связи между большой антенной Кассегрена и изотропной антенной, расположенной в ее геометрической тени

D : диаметр апертуры

φ : половинное значение угла раскрыва

ψ : угол дифракции у края зеркала

l : расстояние от фокуса до точки наблюдения

θ : угол, измеренный между осью и точкой наблюдения P

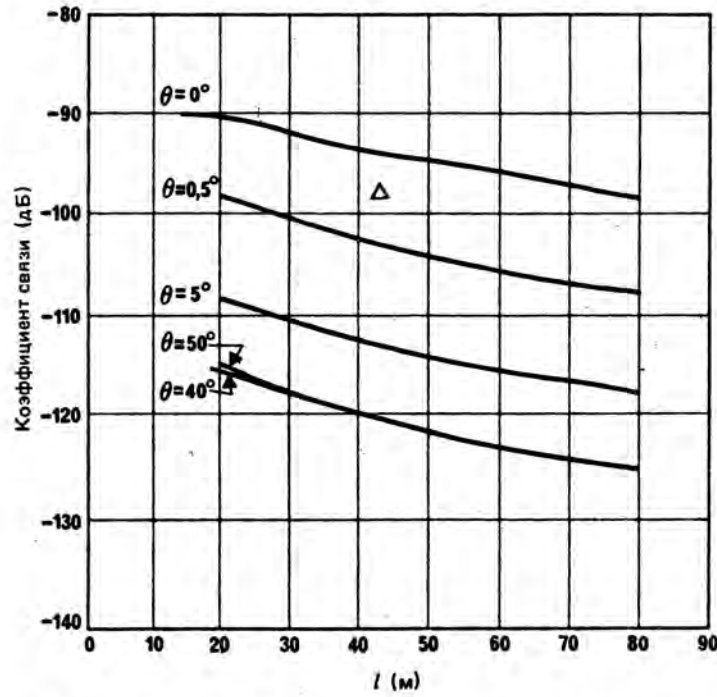


РИСУНОК 2а — Рассчитанный коэффициент связи между 32-метровой антенной и расположенной в ее заднем секторе изотропной антенной (6,0 ГГц)

Δ : точка на расстоянии $l = 41,5$ м и $\theta = 0^\circ$, взятая по измеренным данным на рис. 2б

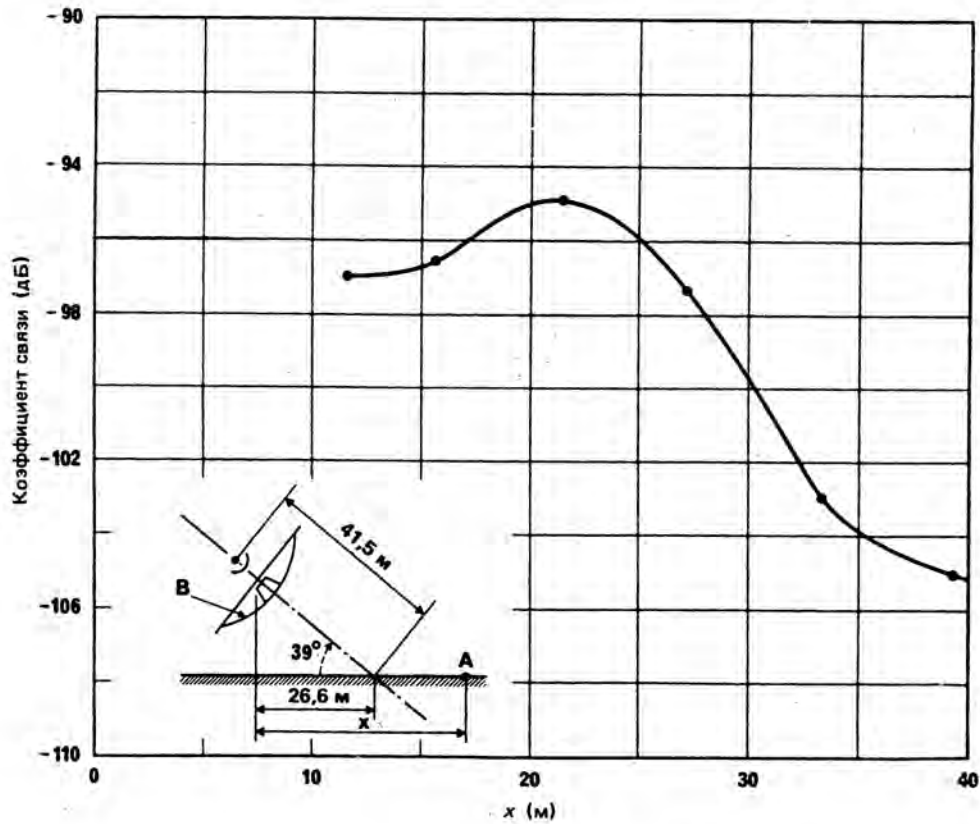


РИСУНОК 2б — Измеренный коэффициент связи между 30-метровой антенной и расположенной за ней изотропной антенной

А: изотропная антенна
В: 30-метровое зеркало, $f = 6,4$ ГГц

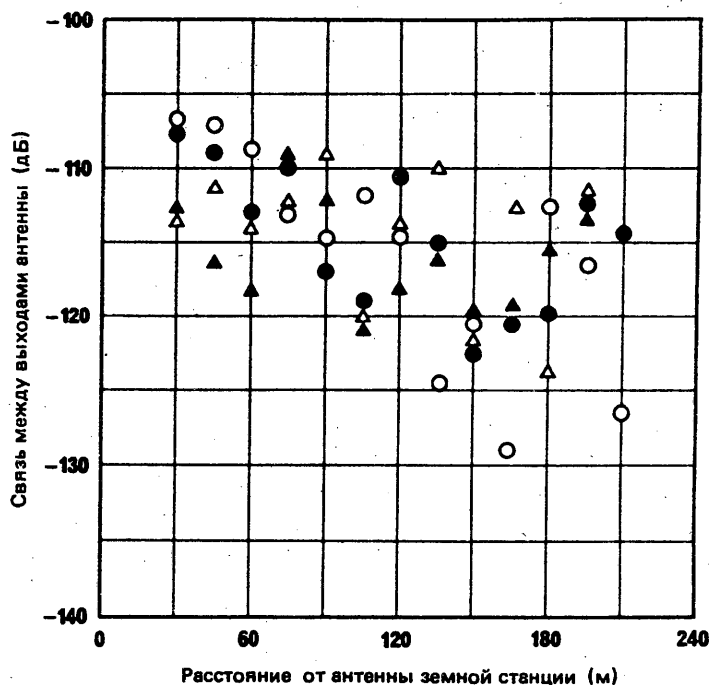


РИСУНОК 3 — Связь между выходом антенны земной станции и рупором со стандартным усилением в зависимости от расстояния

- 180° от азимута основного луча антенны земной станции, верт. пол.
- 180° от азимута основного луча антенны земной станции, гориз. пол.
- ▲ 120° от азимута основного луча антенны земной станции, верт. пол.
- △ 120° от азимута основного луча антенны земной станции, гориз. пол.

3. Возможность совместного расположения антенны земной станции и антенны наземной станции

Ранее при демонстрации работы линии было установлено, что самые большие помехи возникали в результате излучения на частоте 4 ГГц совместно расположенной рупорной антенны, действующего на сигналы, принимаемые со спутника на частоте 4 ГГц антенной земной станции.

После того как были откалиброваны как радиорелейные, так и спутниковые линии связи, были проведены измерения относительного уровня шумов в верхнем канале основной полосы в широком диапазоне изменения уровня сигналов в космических и наземных линиях. Спутниковая линия была отрегулирована так, что мощность шума в канале была $7500 \text{ пВт}_{\text{псф}}$ при отсутствии помех от наземной линии. Наземная линия была спроектирована в соответствии с параметрами передачи ИНТЕЛСАТ-IV, и мощность ее передачи изменялась дискретными ступенями по 5 дБ до тех пор, пока в канале космической линии мощность шума не достигала $10\,000 \text{ пВт}_{\text{псф}}$. После этого индекс модуляции многоканальным сигналом на наземной радиорелейной линии уменьшался на 4 и 10 дБ для того, чтобы исследовать влияние загрузки основной полосы на характеристику чувствительности. В таблице I приведены результаты этих измерений, которые хорошо согласуются с расчетными значениями.

Коэффициент связи изменялся в зависимости от климатических условий и поляризации антенны. Если координация частот между космической и наземной линиями допускала возможность чередования частот, то могло быть достигнуто улучшение в 15 дБ, что позволяло использовать передаваемую мощность в 5 дБВт на частоте 4 ГГц.

Исследовалось также влияние помех на наземную линию путем установления наихудших условий при глобальном обслуживании в спутниковой системе. В этой системе на космической линии было организовано 972 канала а на наземной линии — 1800 каналов. Помехи наземной линии не представляли серьезной проблемы даже при значительно сниженной мощности на наземной линии, работающей на частоте 6 ГГц. При передаче на частоте 6 ГГц из удаленной точки при сниженной мощности, достигающей всего — 12 дБВт (что соответствует принимаемой мощности — 38 дБм), измеренное отношение сигнала к помехе составило около 30 дБ. Соответствующие помехи в основной полосе составляли всего лишь около 1000 пВт_{псф}, что близко совпадает с расчетным значением.

ТАБЛИЦА I — Сводный перечень характеристик космической линии

Число каналов на космической линии (1)	Индекс модуляции многоканальным сигналом на космической линии	Мощность передатчика наземной линии (дБВт)	Число каналов на наземной линии	Индекс модуляции многоканальным сигналом на наземной линии	Коэффициент связи (дБ)	Измеренное отношение сигнала к помехе (дБ)	Расчетное отношение сигнала к шуму на космической линии (дБ)	Измеренное отношение сигнала к шуму на космической линии (дБ)
432	1,50	— 5,0	1800	0,49	142	33,2	51,6	50,2
432	1,50	— 5,0	1800	0,39	142	33,2	51,6	50,2
432	1,50	— 5,0	1800	0,25	142	33,2	51,3	50,2
432	1,50	—10,0	960	1,10	135	30,8	51,6	50,8
432	1,50	—10,0	960	0,70	135	30,8	51,5	50,8
432	1,50	—10,0	960	0,34	135	30,8	51,5	50,8
432	1,50	—10,0	432	1,50	131	27,0	51,2	50,7
432	1,50	—10,0	432	0,95	131	27,0	51,1	50,7
432	1,50	—10,0	432	0,47	131	27,0	51,1	50,7
252	1,54	— 5,0	1800	0,49	132	19,3	51,6	51,1
252	1,54	— 5,0	1800	0,39	132	19,3	50,8	50,6
252	1,54	— 5,0	1800	0,25	132	19,3	50,6	50,1
252	1,54	— 5,0	432	1,50	132	19,2	51,6	52,1
252	1,54	— 5,0	432	0,95	132	19,2	50,8	51,6
252	1,54	— 5,0	432	0,47	132	19,2	50,2	51,6
252	1,54	— 5,0	252	1,54	132	19,2	50,7	50,7
252	1,54	— 5,0	252	0,97	132	19,2	49,6	50,2
252	1,54	— 5,0	252	0,48	132	19,2	49,6	49,7
24	2,55	—10,0	1800	0,49	127	10,9	50,4	50,9
24	2,55	—10,0	1800	0,39	127	10,9	50,4	49,9
24	2,55	—10,0	1800	0,25	127	10,9	49,0	46,9
24	2,55	—10,0	432	1,50	129	12,2	49,4	49,9
24	2,55	—10,0	432	0,95	129	12,2	49,3	48,9
24	2,55	—10,0	432	0,47	129	12,2	46,2	47,6
24	2,55	—10,0	252	1,54	130	14,0	49,8	49,9
24	2,55	—10,0	252	0,98	130	14,0	49,6	49,4
24	2,55	—10,0	252	0,48	130	14,0	47,4	47,9

(1) Использованы стандартные параметры основной полосы ИНТЕЛСАТ-IV.

При наихудшем сочетании сигналов влияние помех на наземную линию было незначительно для всех уровней мощности от + 13 дБВт до — 12 дБВт на частоте 6 ГГц (передаваемых по направлению к земной станции). При передаче из удаленной точки с уменьшенной мощностью, составляющей всего — 12 дБВт, измеренное отношение сигнала к помехе составляло около 30 дБ; соответствующие помехи в основной полосе составляли около 1000 пВт_{псф}. Передавались разнообразные реальные и испытательные видеосигналы, и на обеих линиях не наблюдалось субъективного ухудшения качества передачи.

4. Экспериментальное подтверждение

Результаты испытаний подтверждают, что совместное расположение земной станции и наземных систем, использующих одну и ту же полосу частот, возможно при контролируемых условиях.

В худшем случае (наибольшая связь между двумя антенными системами) может быть выполнена норма обеспечения 10 000 пВт_{псф} в канале спутниковой связи, если мощность передатчика наземной радиорелейной линии будет ограничена примерно до — 10 дБВт, а для коротких линий такая мощность более чем достаточна.

Были проведены дополнительные измерения связи между антеннами в полосе частот около 20 ГГц. Результаты описаны в приложении I. Подтвердилось, что уровни связи антенн, рассчитанные на основе диаграммы направленности в дальней зоне, удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами. Метод, приведенный в пункте 3 приложения I, применим не только для задней зоны зеркала, но также и для того случая, когда антенны направлены друг на друга [Takano и др., 1979].

ССЫЛКИ

TAKANO, T., OGAWA, E., SHINJI, M. and ISHIDA, N. [November, 1979] 20, 30 GHz band Cassegrain earth station antenna for the Japanese domestic satellite communication system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-27, 11, 1728—1731.

Документы МККР

[1978-82]: 4/274 (Япония).

ЛИТЕРАТУРА

DODEL, H. and PONTANO, B. [Fall, 1973] Frequency reuse in collocated earth and terrestrial stations. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 3, 2, 443—448.

JENKINS and WHITE [1967] *Fundamentals of Optics*. 4th Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, NY, USA.

POTTS, J. B. [Spring, 1972] Feasibility of collocating a radio relay station with a sharing earth station. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 2, 1, 205—219.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ АНТЕННЫ ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ НА ЧАСТОТЕ ВЫШЕ 10 ГГц

1. Введение

Необходимо изучить связь антенны земной станции с антенной наземной радиорелейной линии в полосе частот 20/30 ГГц, поскольку обе системы совместно используют одни и те же полосы частот [Takano и др., 1979]. В настоящем приложении описываются экспериментальные результаты и испытания, проведенные с целью выяснения зависимости характеристик связи антенн от их направленных свойств. Также показано, что метод оценки, использующий диаграмму направленности в дальней зоне, а не метод зоны Френеля, который применялся в основной части данного Отчета, является более эффективным при расчете связи антенны в ближней зоне на расстояниях вплоть до 20 м.

2. Результаты измерений

В качестве антенны земной станции использовались 11,5-метровая осесимметричная антенна Кассегрена [Takano и др., 1979] и 11,5-метровая антенна Кассегрена с вынесенным облучателем. В качестве антенны наземной радиорелейной линии использовалась 2,7-метровая антенна Кассегрена [Egami и др., 1980].

На рис. 4 и 5 показаны расположения антенн для измерения связи. Как показано на рис. 4, 2,7-метровая антенна расположена в заднем секторе антенны земной станции. Расстояние между центрами антенн около 20 м. В случае, изображенном на рис. 5, 2,7-метровая антенна направлена прямо на антенну земной станции при расстоянии примерно 30 м. Характеристики связи антенн измерялись при вращении 2,7-метровой антенны с использованием частоты 19,5 ГГц.

На рис. 6 и 7 показаны экспериментальные результаты. Абсциссы указывают углы между осью луча 2,7-метровой антенны и направлением на антенну земной станции.

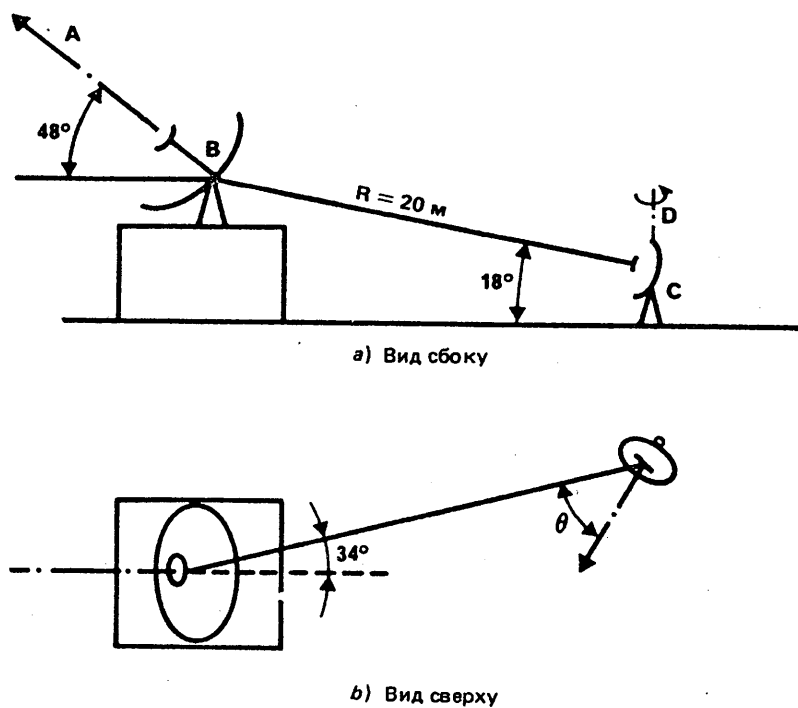


РИСУНОК 4 — Расположение антенн для измерения связи ($R = 20$ м)

- A: направление на спутник
- B: 11,5-метровая антенна Кассегрена земной станции
- C: 2,7-метровая антенна наземной станции
- D: ось вращения
- R: расстояние между двумя антеннами

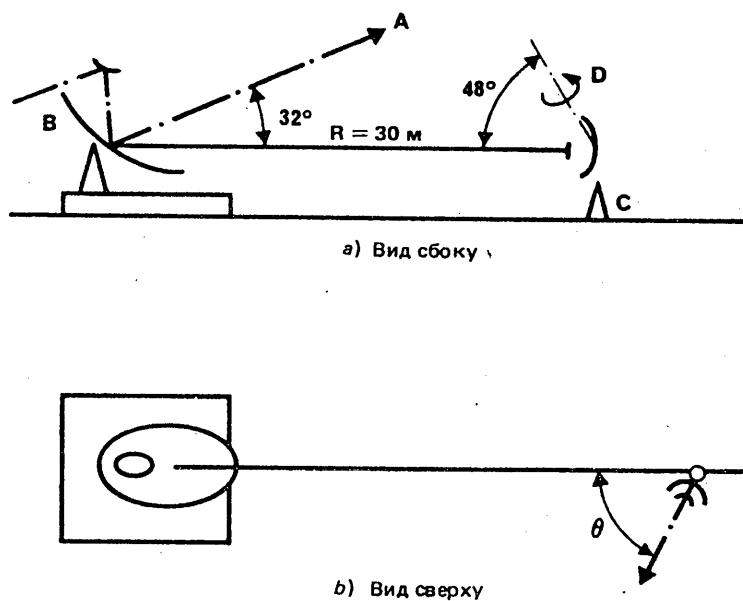


РИСУНОК 5 — Расположение антенн для измерения связи ($R = 30$ м)

- A: направление на спутник
- B: 11,5-метровая антенна Кассегрена земной станции с вынесенным облучателем
- C: 2,7-метровая антенна наземной станции
- D: ось вращения
- R: расстояние между двумя антеннами

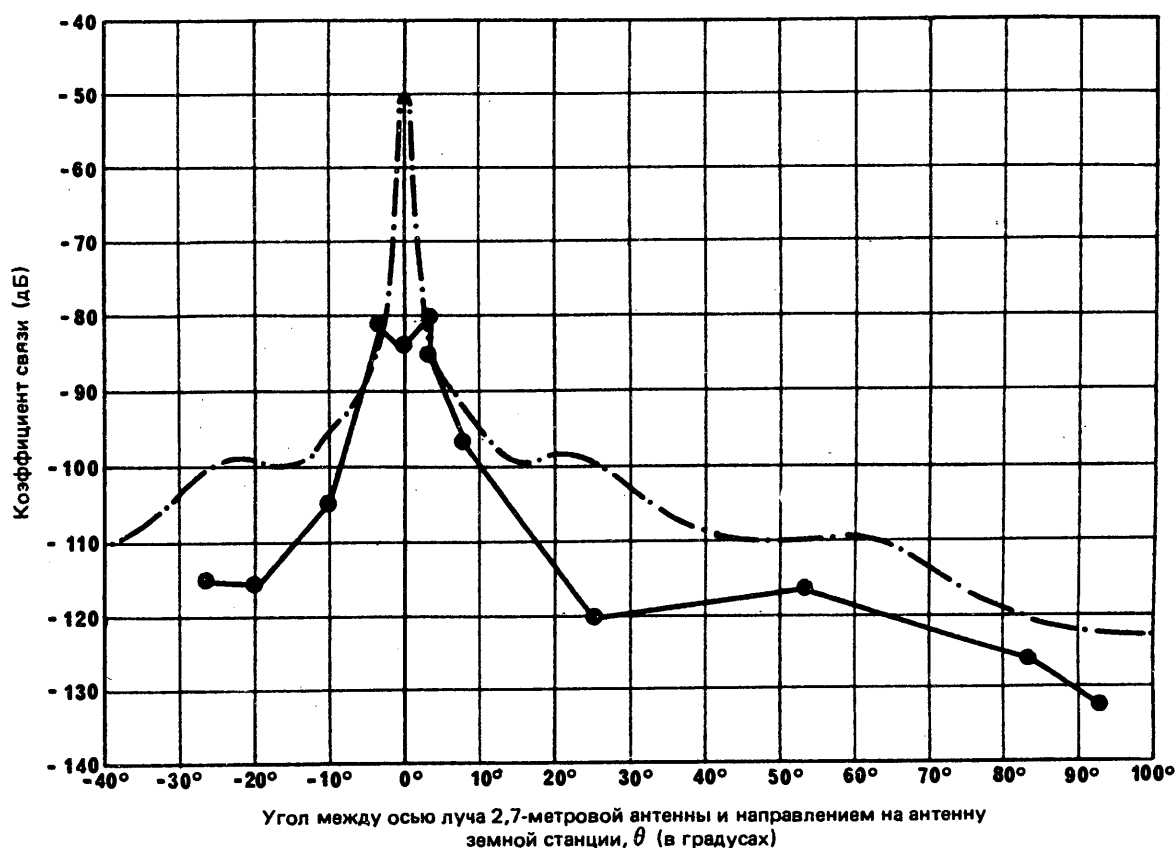


РИСУНОК 6 — Результаты измерений при расположении антенн, изображенном на рис. 4

—●—●—●— Измеренные
 - - - - - Расчетные
 ($f = 19,5$ ГГц, $R = 20$ м)

3. Оценка связи антенн.

Уровни оценки, изображенные на рис. 6 и 7, вычислены на основе диаграммы направленности в дальней зоне и потерь на трассе. Коэффициент связи C определяется следующим образом:

$$C = \frac{G_t \cdot G_r}{L}, \quad (2)$$

где

G_t : коэффициент усиления передающей антенны в направлении на приемную антенну;

G_r : коэффициент усиления приемной антенны в направлении на передающую антенну;

L : потери на трассе $= (4\pi R/\lambda)^2$, R — расстояние между двумя антеннами, λ — длина волны.

Результаты испытаний показывают, что максимальные коэффициенты связи могут быть приблизительно оценены с помощью выражения (2). Даже если измеренное значение связи слегка превосходит расчетное, то разница составляет менее 5 дБ. Можно также рассчитать коэффициент связи, когда антенна наземной линии и антенна земной станции направлены друг на друга, как показано на рис. 5. Этот метод предложен в приложении I к Отчету 390.

Представляется, что метод оценки, данный в виде выражения (2), более эффективен и практичен, чем метод, предложенный в выражении (1), который дает коэффициент связи только для направления, противоположного излучению земной станции. Основанием для этого являются следующие аргументы:

- он может применяться, когда антенны направлены друг на друга, а также тогда, когда антенна земной станции не направлена на антенну наземной станции;

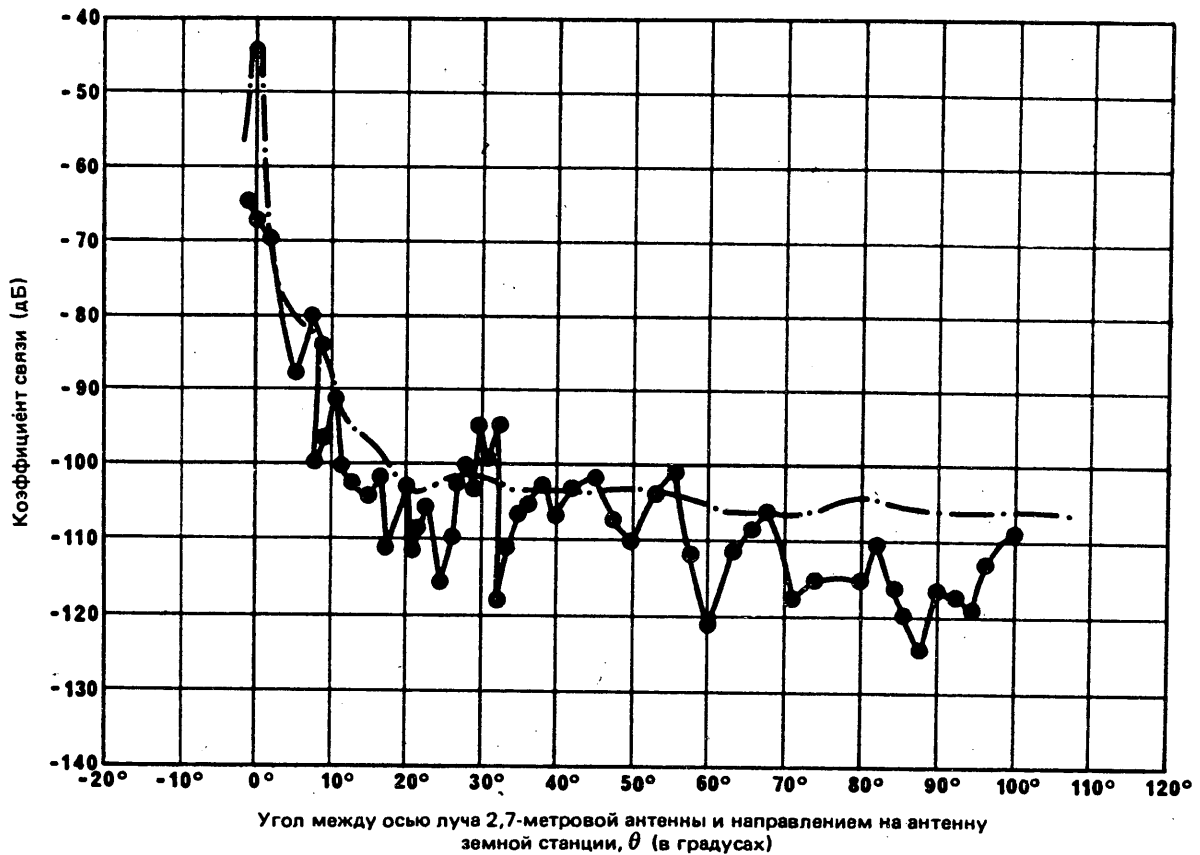


РИСУНОК 7 — Результаты измерений при расположении антенн, изображенном на рис. 5

—●—●—●— Измеренные
 - - - - - Расчетные
 ($f = 19,5$ ГГц, $R = 30$ м)

- он может применяться для антенн с несимметричным зеркалом, таких как антенны с вынесенным облучателем;
- коэффициент ухудшения диаграммы направленности должен учитывать не только дифракцию у края зеркала, но также влияние точности изготовления поверхности и рассеяния от швов зеркала [Takano и др., 1980]. Следовательно, метод оценки, использующий диаграмму направленности, дает более обоснованный коэффициент связи.

4. Заключение

Экспериментальные результаты в полосе частот около 20 ГГц подтверждают тот факт, что коэффициент связи антенн может быть приблизительно оценен с использованием диаграммы направленности в дальней зоне. Этот метод расчета эффективен и применим для всех ориентаций антенн земных станций.

Необходимо провести дальнейшие исследования для тех случаев, когда расстояние связи меньше 20 м.

ССЫЛКИ

- EGAMI, S., OKAMOTO, T. and FUKETA, H. [February, 1980] K-band mobile earth station for domestic satellite communications system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, 2, 291—294.
- TAKANO, T., OGAWA, E., HORI, T. and SHINJI, M. [June, 1980] Offset Cassegrain earth station antenna for the Japanese domestic satellite communications system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, 6, 883—889.
- TAKANO, T., OGAWA, E., SHINJI, M. and ISHIDA, N. [November, 1979] 20, 30 GHz band Cassegrain earth station antenna for the Japanese domestic satellite communications system. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-27, 11, 1728—1731.

ОТЧЕТ 792-3

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ, УСРЕДНЕННОЙ В ПОЛОСЕ ШИРИНОЙ 4 кГц, ДЛЯ СИГНАЛА С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

(Вопросы 32/4 и 23/9, Исследовательская программа 23А/9)

(1978—1982—1986—1990)

1. Введение

В соответствии со Статьей 11 Регламента радиосвязи администрация, которая намеревается создать спутниковую систему, должна послать Международному комитету регистрации частот информацию, перечисленную в Приложении 4 к Регламенту радиосвязи. Кроме того, администрация, запрашивающая у какой-либо другой администрации координацию частотного присвоения космической станции на геостационарном спутнике, должна послать этой администрации информацию, перечисленную в Приложении 3 к Регламенту радиосвязи.

Представляя сведения, перечисленные в Приложениях 3 и 4, такая администрация должна рассчитать максимальную плотность мощности на Гц на входе антенны, усредненную в пределах наихудшей полосы, шириной 4 кГц для сигналов на частотах ниже 15 ГГц. Однако обобщенные методы расчета максимальной плотности мощности сигнала до сих пор не всегда указывались.

В настоящем Отчете представлены методы расчета максимальной спектральной плотности мощности сигналов с угловой модуляцией, которые должны использоваться для заявления и координации частотных присвоений станциям радиоастрономии и космической радиосвязи, за исключением станций радиовещательной спутниковой службы, в соответствии со Статьей 11 Регламента радиосвязи.

Для того чтобы при координации и заявлении присвоений рассматривалась наихудшая помеховая ситуация, спектральную плотность мощности следует рассчитывать в условиях легкой нагрузки. Для крайнего случая, то есть при немодулированной несущей или когда необходимая ширина излучения меньше 4 кГц, мощность в пределах полосы 4 кГц считается численно равной общей мощности излучения.

2. Расчет максимальной плотности мощности (усредненной в полосе шириной 4 кГц) сигнала с угловой модуляцией

2.1 Общие положения

Ниже приводится метод расчета уровня мощности в худшей полосе 4 кГц (Вт/4 кГц). Плотность мощности на герц, которая требуется согласно Регламенту радиосвязи, получается путем деления этой величины на 4000.

2.2 Максимальная плотность мощности в полосе 4 кГц ЧМ сигнала

2.2.1 ЧМ сигнал, модулированный телевизионным видеосигналом

— В случае, когда сигнал дисперсии энергии треугольной формы наложен на видеосигнал, максимальная плотность мощности в полосе 4 кГц для худшего случая определяется выражением:

$$\frac{P_t}{\Delta F} \times 4000 \quad (\text{Вт/4 кГц}), \quad (1)$$

где

P_i : общая мощность сигнала (Вт);

ΔF : размах девиации частоты, вызванный сигналом дисперсии энергии (Гц).

Примечание. — В выражении (1) предполагается использование идеально линейного сигнала дисперсии треугольной формы. Ошибка при этом для распространенных ТВ-ЧМ передач является ничтожно малой.

— В случае, когда нет модуляции и сигнал дисперсии энергии не применяется, максимальная плотность мощности в полосе 4 МГц для худшего случая выражается:

$$P_i \quad (\text{Вт/4 кГц}).$$

2.3 Максимальная плотность мощности в полосе 4 кГц ФМ сигнала, модулированного многоканальным телефонным сигналом [Yokoуama и др., 1976]

Если ФМ сигнал модулируется многоканальным телефонным сигналом, максимальная плотность мощности определяется на центральной частоте сигнала. Это справедливо в том случае, если верхняя частота основной полосы намного больше нижней частоты основной полосы. Выражение для максимальной плотности мощности при таком условии будет следующим:

$$\text{— при } \beta \sigma_a \geq 2 : \quad \frac{P_i}{(\beta \sigma_a) f_h} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \times 4000 \quad (\text{Вт/4 кГц}); \quad (2)$$

— при $\beta \sigma_a < 2$ максимальная плотность мощности в полосе 4 кГц равна сумме следующих двух членов:

$$\text{— непрерывной части спектра: } P_i \times S(0) \times 4000 \quad (\text{Вт/4 кГц}); \quad (3)$$

$S(0)$ можно найти из рис. 1, на котором даны величины отношения общей мощности сигнала к плотности мощности в полосе f_h (Гц);

$$\text{— остаточной несущей: } P_i \exp \{ -(\beta \sigma_a)^2 \} \quad (\text{Вт}), \quad (4)$$

где

P_i : общая мощность сигнала (Вт);

$\beta \sigma_a$: девиация фазы многоканальным сигналом (рад);

β : среднеквадратичная девиация фазы испытательным тоном (рад);

σ_a : коэффициент загрузки многоканальным телефонным сигналом.

$$\sigma_a = \begin{cases} 10^{\frac{-15 + 10 \log N}{20}} & (\text{при } N \geq 240) \\ 10^{\frac{-1 + 4 \log N}{20}} & (\text{при } N < 240); \end{cases}$$

N : число каналов;

f_h : верхняя частота основной полосы (Гц).



РИСУНОК 1 — Плотность мощности на центральной частоте непрерывной части спектра мощности ФМ сигнала в полосе f_h

2.4 Максимальная плотность мощности в полосе 4 кГц фазоманипулированного сигнала

Максимальная плотность мощности ФМ сигнала в полосе 4 кГц, модулированного цифровым сигналом дисперсии энергии псевдослучайной последовательности (ПСП), определяется выражением

$$P_t \times (4000/B) \quad (\text{Вт/4 кГц}), \quad (5)$$

если период повторения ПСП превышает 250 мкс, и выражением

$$P_t \cdot \frac{L+1}{L^2} \left\{ \left[\frac{4000}{1/Lt} \right] + 1 \right\} \quad (\text{Вт/4 кГц}), \quad (6)$$

если период повторения ПСП равен или меньше 250 мкс;

где

P_t : общая мощность сигнала (Вт),

B : скорость передачи символов (символ/с),

L : длина псевдослучайной последовательности (символов),

t : длительность символа (с).

$$\left[\frac{4000}{1/Lt} \right] : \text{целая часть } \frac{4000}{1/Lt}.$$

Приведенные выше выражения относятся к случаю модуляции ФМ сигнала сигналом ПСП и будут применяться, когда на манипулированный по фазе сигнал непрерывно накладывается псевдослучайная последовательность скремблера. В результате применения этих выражений к таким системам, как МДВР, в которых преамбула сигнала, дополнительные символы проверки на четность и т. п. не скремблируются, могут появиться большие ошибки. Кроме того, в многофазных системах равномерность спектра, ожидаемая из-за случайного характера сигнала дисперсии, может быть нарушена работой часто используемого относительного кодирования.

Следует отметить, что в вышеизложенном нет никаких указаний относительно предположений, которые следует делать, чтобы охватить случай фазоманипулированных систем без дисперсии энергии при таких условиях, когда структура последовательности посылок может повторяться, концентрируя мощность в относительно небольшом количестве спектральных линий. Хотя данная проблема и затрагивается в Отчете 384, эту работу необходимо продолжить.

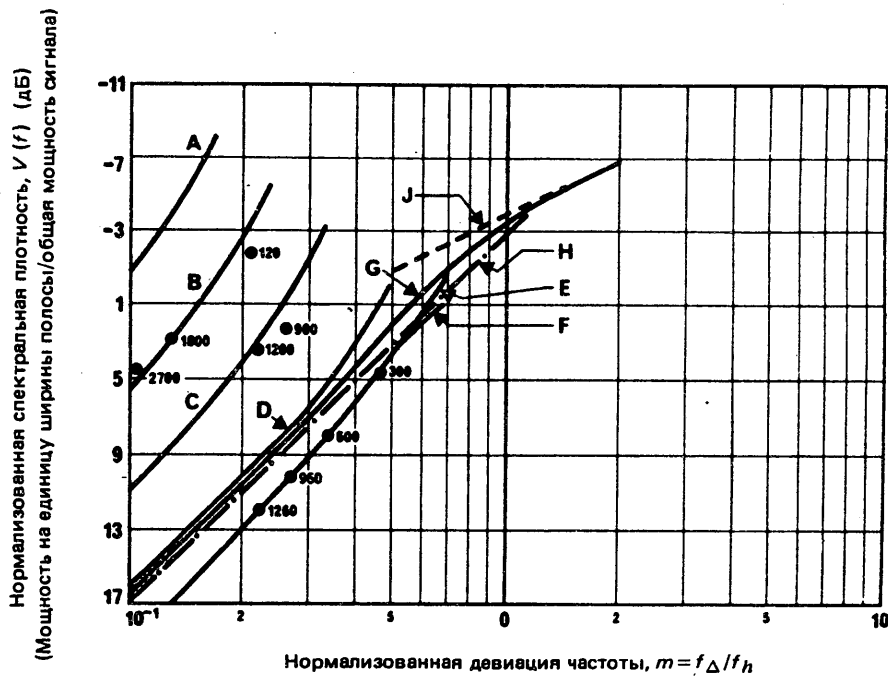


РИСУНОК 2 — Максимальная спектральная плотность сигнала (распределенная составляющая), модулированного по частоте гауссовым шумом (предысказание согласно Рекомендации 275)

- | | |
|--------------------------|--|
| Кривые A: $\psi_0 = 0,1$ | F: $\psi_0 = 4,0$ |
| B: $\psi_0 = 0,2$ | G: $\psi_0 = \infty$ |
| C: $\psi_0 = 0,4$ | H: аппроксимация при малой девиации (Отчет 792) |
| D: $\psi_0 = 1,0$ | J: аппроксимация при большой девиации |
| E: $\psi_0 = 2,0$ | ●: величины для стандартных радиорелейных систем (согласно этикеткам) даны для следующих пределов основной полосы: |
| | 120 каналов 60—552 кГц |
| | 960 каналов 60—4028 кГц |
| | 1260 каналов 60—5636 кГц |

Для остальных радиорелейных систем, показанных на рис. 2, величины максимальной спектральной плотности мощности применимы для любого из пределов основной полосы, указанных в Рекомендации 380, так как их значения β относительно постоянны и соответствуют тем, которые используются на рис. 2.

Что касается основных полос, у которых другие величины β , то вместо рис. 2 следует использовать рис. 9f—9j из Отчета 388.

ССЫЛКИ

YOKOYAMA, M., SASAOKA, H. and KOBAYASHI, T. [March 1976] Power spectrum of a phase-modulated wave by a multiplex telephony signal, *J. Radio Res. Labs. (Japan)*, Vol. 23, 110, 1—15.

ОТЧЕТ 449-1

**ИЗМЕРЕННЫЕ ПОМЕХИ В ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМАХ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ,
СОВМЕСТНО ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЧАСТОТЫ С СИСТЕМАМИ ФИКСИРОВАННОЙ
СПУТНИКОВОЙ СЛУЖБЫ ИЛИ С НАЗЕМНЫМИ СИСТЕМАМИ**

(Вопросы 32/4 и 23/9, Исследовательская программа 23А/9)

(1970—1974)

1. Введение

Определяя условия, при которых системы фиксированной спутниковой службы могут совместно использовать одни и те же полосы частот, а также использовать полосы частот совместно с наземными системами, необходимо связать ухудшение качества изображения с отношением мощности полезного сигнала к мощности мешающего сигнала. В отличие от телефонной связи, для которой расчеты являются надежными, рассчитать помехи между двумя телевизионными сигналами с частотной модуляцией невозможно; поэтому следует полагаться на измерения.

Измерения были проведены в нескольких странах, и их результаты суммированы в § 2 и 3, соответственно, для субъективных и объективных измерений.

Следует заметить, что любые конкретные значения уровня помех, приводимые в данном Отчете, не рекомендуются в качестве пригодных норм на помехи. Допустимые помехи должны быть включены в общую норму телевизионного шума.

2. Субъективные измерения

2.1 Испытания, проведенные в Соединенных Штатах Америки

С тщательной проверкой были проведены субъективные лабораторные испытания помех между сигналами, модулированными по частоте с предискажениями цветными телевизионными сигналами NTSC 525 строк с размахом частоты 8 МГц, чтобы представить использование радиорелейными линиями, и с размахом 24 МГц, чтобы представить использование спутниками связи. Цепи предискажений и компенсации предискажений соответствовали Рекомендации 405, кривая В. Для полезного сигнала использовался модулирующий видеосигнал, образованный цветным телевизионным тест-диапозитивом, тогда как для мешающего сигнала использовался модулирующий видеосигнал, полученный от приема коммерческой телевизионной программы. Мешающий сигнал также модулировался сигналом дисперсии частоты 30 Гц треугольной формы, амплитуда которого была установлена так, чтобы вызывать размах частоты 2 МГц. Предполагалось, что действительное значение не станет рекомендацией для реальных систем, а просто будет обозначать уровень, который позволит оценить его субъективное влияние на системы при разных девиациях. Были проведены измерения с двумя сигналами на одной и той же частоте, с двумя сигналами, разнесенными на 10 и 20 МГц. Кроме того, были проведены измерения с сигналом ЧРК-ЧМ емкостью 960 каналов и с сигналом ЧРК-ЧМ емкостью 1800 каналов, создающими помехи системе ТВ-ЧМ с указанными выше разнесами сигналов. Отношение сигнала к тепловому шуму полезного сигнала определялось телевизионной передающей камерой (46,4 дБ — невзвешенное и 53,8 дБ — взвешенное). Отношение сигнала к шуму системы передачи было больше, чем 73 дБ. Следовательно, система передачи не ухудшала исходный сигнал. Результаты могут быть иными при наличии дополнительного треугольного теплового шума.

Использовалось прецизионное телевизионное и радиооборудование, а помехи оценивались десятью наблюдателями, которые имели опыт оценки ухудшения телевизионного изображения. Каждый наблюдатель три раза оценивал каждое условие испытания. Условия испытаний выбирались случайно; поэтому для каждого условия испытания было получено тридцать оценок, что в итоге дало плавное распределение данных и основание

для большой статистической достоверности результатов. Условия наблюдения телевизионного изображения выбирались таким образом, чтобы ухудшения не могли остаться незамеченными. Видеоконтрольное устройство, по которому велось наблюдение, находилось в затемненной комнате, а яркость и контрастность изображения устанавливались на таком уровне, который казался наиболее приятным для глаза экспериментатора. Таким образом, условия походили на условия в телевизионной студии и видеорежиссерской аппаратуре.

Для оценки изображения использовалась семибалльная шкала ухудшения, начиная со степени 1 (невосприимчивое ухудшение) до степени 7 (крайне нежелательное ухудшение). Были выведены нормальные распределения, соответствующие реакции на каждую степень ухудшения.

Во время испытаний отношение размаха частоты системы, подвергающейся помехам, было постоянным, а спектр мешающего сигнала был всегда преднамеренно расширен, хотя сигнал основной полосы реальной системы может состоять только из синхронизирующего сигнала и сигнала дисперсии. Это условие было проверено; субъективные реакции оставались неизменными, если:

- вся мощность мешающего радиоканала сосредоточена в пределах полосы полезного сигнала (размах частоты плюс удвоенная высшая модулирующая частота), модулированного или немодулированного;
- мощность мешающего радиоканала почти полностью сосредоточена вне этой полосы полезного сигнала, модулированного или немодулированного.

Однако если модулированный мешающий сигнал имеет мощность, сосредоточенную в пределах спектра сигнала, испытывающего помехи, а немодулированный сигнал полностью сосредоточен вне этого спектра, то модулированный сигнал создает больше помех.

Было установлено, что степень ухудшения черно-белого телевизионного изображения 525 строк близка к степени ухудшения цветного телевизионного изображения NTSC 525 строк.

Испытания проводились с одним мешающим сигналом.

Результаты воздействия помех, соответствующие степени 2 или лучшие, представлены в таблицах I, II и III в виде среднего (μ) и стандартного отклонения (σ) нормального распределения.

Кроме испытаний с участием десяти наблюдателей были проведены дополнительные испытания с одним наблюдателем для определения вызванных помехами ухудшений, которые нелегко оценивались десятью наблюдателями.

ТАБЛИЦА I — Отношение помех (дБ) для нормального распределения, соответствующего степени 2 ухудшения или лучше, между полезным видеосигналом, образованным тест-диапозитивом, и мешающим видеосигналом, полученным от приема типичной цветной программы

Размах частоты (МГц)		Разнос по частоте (МГц)	μ (дБ)	σ (дБ)
полезный сигнал	мешающий сигнал			
24	24	0	19,9	3,1
24	8	0	19,6	1,5
8	8	0	28,7	2,3
8	24	0	29,2	2,5
24	8	10	14,7	3,0
8	24	10	25,5	3,7
24	24	20	11,9	1,6
24	8	20	7,2	1,6
8	8	20	9,8	2,3
8	24	20	16,5	1,7
24	8	3,24	20,6	3,0

ТАБЛИЦА II — Отношение помех (дБ) для нормального распределения, соответствующего степени 2 ухудшения или лучше, между полезным видеосигналом, образованным тест-диапозитивом, и мешающим сигналом ЧРК-ЧМ системы емкостью 960 каналов

Полезный сигнал Размах частоты (МГц)	Мешающий сигнал Отношение среднеквадратичного отклонения частоты к высшей частоте основной полосы		Разнос по частоте (МГц)	μ (дБ)	σ (дБ)
	одно-канальный	много-канальный			
24	0,044	0,25	10	11,1	1,5
24	0,044	0,25	0	14,9	2,5
8	0,132	0,75	10	21,4	3,2

ТАБЛИЦА III — Отношение помех (дБ) для нормального распределения, соответствующего степени 2 ухудшения или лучшему, между полезным видеосигналом, образованным тест-диапозитивом, и мешающим сигналом ЧРК-ЧМ системы емкостью 1800 каналов

Полезный сигнал Размах частоты (МГц)	Мешающий сигнал Отношение среднеквадратичного отклонения частоты к высшей частоте основной полосы		Разнос по частоте (МГц)	μ (дБ)	σ (дБ)
	одно- канальный	много- канальный			
24	0,051	0,38	0	14,2	1,9
24	0,051	0,38	20	9,7	1,5

2.1.1 Были проведены исследования наихудшего разнеса по частоте. Эти исследования проводились при постоянном разнесе по частоте, начиная от совмещения каналов до разнеса, равного верхней частоте основной полосы 4,2 МГц. Было определено, что при разнесе 3,24 МГц помеха была несколько больше. Этот разнос был затем оценен десятью наблюдателями; результаты оценок представлены в таблице I. Оказалось, что количественные различия в оценках групп наблюдателей слишком малы, чтобы их можно было надежно определить при субъективных испытаниях.

2.1.2 Помехи между системами, сигналы которых разнесены на 40 МГц, были слишком малы, чтобы вызывать какое-либо ухудшение изображения. Фактически, чтобы помеху можно было наблюдать, мешающий сигнал должен превышать полезный сигнал. Однако механизм, создающий большую часть помех, зависит от конкретного приемного фильтра; следовательно, нельзя обобщать результат этого эксперимента.

2.1.3 Были также проведены исследования, при которых полезный и мешающий сигналы дополнительно модулировались сигналами звуковых частот. Сигналы звуковой частоты накладывались на переднюю площадку гасящего импульса в интервале синхронизации строчной развертки телевизионного сигнала в виде сигнала импульсно-кодовой модуляции. Ухудшение изображения от этого канала в 5 кГц не ожидалось, и, действительно, при измерениях оно не было обнаружено.

2.2 Испытания, проведенные в Соединенном Королевстве

Была проведена серия испытаний, чтобы оценить защитные отношения, требующиеся между телевизионными системами, использующими частотную модуляцию. С помощью видеоконтрольного устройства черно-белого изображения были сделаны субъективные оценки, хотя фактически используемые сигналы были цветowymi сигналами.

Условия, в которых проводились испытания, не были идеальными, и результаты, полученные на этом этапе, были представлены всего лишь как приблизительная основа для решения проблем, связанных с помехами. Тем не менее отмечается, что полученные результаты согласуются в значительной степени с результатами, полученными при более обширных измерениях, проведенных в Соединенных Штатах Америки.

Для оценки ухудшений изображения в этих субъективных испытаниях использовалась шестибальная шкала, начиная со степени 1 (невоспринимаемое ухудшение) до степени 6 (неприемлемое ухудшение).

В основной серии испытаний с сигналами в совмещенном канале при постоянной девиации и без рассеяния энергии участвовало 48 наблюдателей. Из них 16 имели техническое образование, 32 такого образования не имели; никто из наблюдателей не имел опыта оценки изображения. Просматриваемый материал, по которому оценивалось изображение, включал отобранные прямые передачи фильмов и испытательные таблицы.

Во время дополнительных испытаний, в ходе которых изучалось влияние девиации, рассеяния энергии, разнеса сигналов и содержания изображения, оценки производились одним наблюдателем с технической подготовкой и с определенным опытом оценки изображений.

Во всех случаях полезный и мешающий сигналы находились в совмещенном канале. Полезный сигнал поступал от радиовещательного приемника и подавался на ЧМ модулятор, работающий на частоте 70 МГц, через стандартную цепь предусаждений. Мешающий сигнал поступал от генератора градиационного клина 625 строк и также предусаждался и модулировался. Номинальный размах частоты обоих сигналов был 8 МГц без предусаждения.

Два сигнала смешивались на промежуточной частоте с аттенуатором, включенным в тракт мешающего сигнала для того, чтобы установить относительные уровни. Сигнал с выхода демодулятора подавался после цепи компенсации предсказаний на видеоконтрольное устройство.

Испытания проводились сначала при девиации частоты 8 МГц как полезного, так и мешающего сигналов. Было установлено, что защитные отношения, признанные 50% наблюдателей как соответствующие определенной степени или лучшие, изменялись приблизительно линейно от 33 до 6 дБ в зависимости от степени 1—6 ухудшения изображения. Конкретными значениями были:

50% степень 1: — 33 дБ;

50% степень 2 или лучше: — 26 дБ.

Затем девиация частоты полезного сигнала изменялась от 4 до 21 МГц, при этом девиация частоты мешающего сигнала оставалась постоянной — 8 МГц. Оказалось, как и можно было предполагать, что требуемое защитное отношение уменьшалось приблизительно пропорционально увеличению девиации частоты полезного сигнала (то есть один дБ на дБ). Однако это соотношение не выдерживалось при более значительных девиациях (то есть больше 12 МГц); так, при девиации в 21 МГц защитное отношение было примерно на 2—3 дБ меньше, чем предполагалось на основе линейной экстраполяции результатов при малых значениях девиации.

Представляется, что использование подходящего защитного отношения для конкретных случаев с малой девиацией, например 8 МГц, изменяемого линейно (один дБ на дБ), чтобы учесть фактическую девиацию, будет представлять собой приблизительный способ решения проблемы при различных значениях девиации.

Когда оценка ухудшения изображения соответствовала приблизительно степени 1,5, содержание изображения мешающего сигнала не влияло или влияло незначительно на требуемое защитное отношение.

Когда оценка ухудшения изображения соответствовала приблизительно степени 1,5, введение сигнала дисперсии энергии в мешающий сигнал не влияло или влияло незначительно на требуемое защитное отношение.

Оказалось также, что на помехи не влияют небольшие изменения частоты мешающего сигнала. По мере того как разность частот сигналов превышала примерно 1 МГц, наблюдалось постепенное субъективное улучшение, особенно при высоких уровнях помех, однако количественные оценки не сообщались.

2.3 Испытания, проведенные во Франции

Был проведен ряд испытаний, являющихся частью программы по определению приемлемых защитных отношений мощностей полезного и мешающего сигналов, когда сигнал, модулированный по частоте телефонным многоканальным сигналом, создает помехи частотно-модулированному телевизионному сигналу. Результаты были выражены в виде отношения мощности полезного сигнала к мощности мешающего сигнала (C_u/C_s), соответствующего определенному ухудшению в зависимости от разности номинальных значений несущих частот полезного и мешающего сигналов.

Полезный сигнал модулировался 75%-ной испытательной таблицей цветных полос, передаваемой в системе СЕКАМ 625 строк. Были последовательно выбраны нормы модуляции сигнала в соответствии с нормами, рекомендованными для телевизионных радиорелейных систем прямой видимости (Рекомендация 405 и Рекомендация 276), а также нормами, которые используются в некоторых системах фиксированной спутниковой службы. В последнем случае использовалось рассеяние энергии (симметричный треугольный сигнал с частотой 25 Гц).

Мешающий сигнал был модулирован в соответствии с нормами, применяемыми в тех же спутниковых системах, сигналом, моделирующим телефонный многоканальный сигнал с максимальной емкостью 24, 60, 132 или 1872 канала. Модулирующий сигнал представлял собой либо (а) подходящим образом фильтрованный и предсказанный белый шум, моделирующий максимальную нагрузку для данной емкости, либо (б) треугольный сигнал дисперсии энергии, моделирующий условия без нагрузки и отрегулированный так, что спектральная плотность сигнала с дисперсией имела максимальное значение на 2 дБ больше, чем полученное при модуляции белым шумом.

Поскольку не были найдены удовлетворительные объективные критерии для характеристики помех телевизионному сигналу основной полосы, было решено провести испытания с использованием только субъективного метода. Субъективный уровень помех был выбран так, чтобы он соответствовал порогу зрительного восприятия при отсутствии теплового шума, когда наблюдатель находится в слабо освещенном помещении на расстоянии от экрана, в шесть раз превышающем высоту изображения. Пример полученных результатов приведен на рис. 1, где показаны помехи сигналу спутниковой телевизионной системы от сигнала ЧРК-ЧМ емкостью 132 канала.

Номинальная частота канала, передающего телевизионный сигнал, была определена как частота, соответствующая среднему уровню серого (медианное напряжение яркости между значениями, соответствующими черному и белому). Частотно-модулированная система представляла собой такую систему, которой можно было присваивать частоту, подстраиваемую к уровню, соответствующему основанию синхронимпульсов.

После повторных измерений, проведенных в одних и тех же условиях, можно было оценить полученные результаты с точностью до 2 дБ.

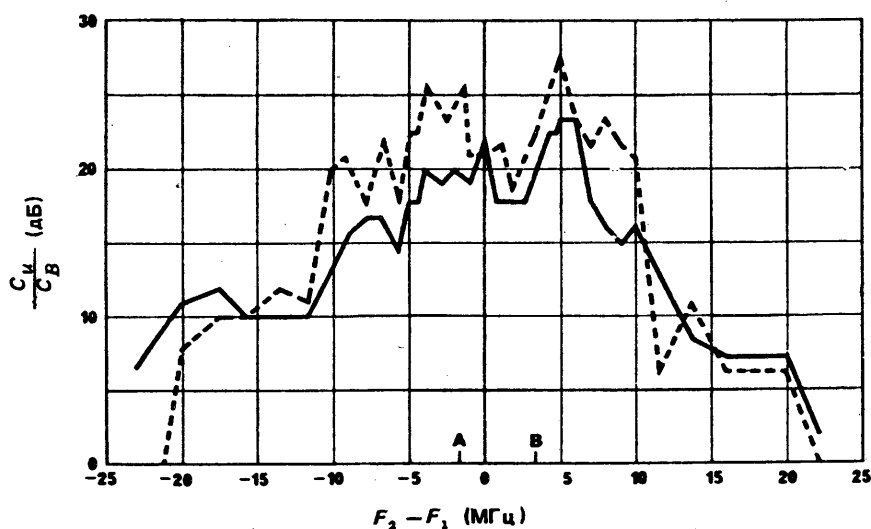


РИСУНОК 1

Полезный сигнал: телевизионный
(спутниковый)

Мешающий сигнал: телефонный 132-
канальный (случай 2)

———— : полная нагрузка

----- : без нагрузки

F_1 : несущая частота полезного сигнала

F_2 : несущая частота мешающего сигнала

А: белый

В: основание синхронимпульсов

3. Объективные измерения

Испытания, проведенные в Канаде

Представлены результаты объективных измерений шума от помех в совмещенном канале в телевизионной системе 525 строк при наличии теплового шума. Для моделирования реальных рабочих условий мешающий сигнал модулировался по частоте прямым видеосигналом, принимаемым от местной радиовещательной станции. Уровни помехи и теплового шума устанавливались независимо для создания разнообразных рабочих условий. Полезный и мешающий сигналы смешивались на промежуточных частотах. На выходе широкополосного демодулятора измерялась сумма шума от помех и теплового шума.

Субъективные результаты, описанные в пункте 2, показывают, что помехи не очень чувствительны к характеристикам модуляции мешающего сигнала, но зависят от девиации частоты полезного сигнала. Это позволяет предположить, что можно использовать одну формулу для расчета «коэффициента ослабления помех» для помех между частотно-модулированными телевизионными сигналами.

На рис. 2 приводятся результаты измерений при размахе частоты как полезного, так и мешающего сигналов, равном 24 МГц. Были также проведены испытания при девиации частоты 8 МГц мешающего сигнала, но это фактически не оказало влияния на уровень взвешенного шума от помех в основной полосе. Это согласуется с субъективными испытаниями, изложенными в пункте 2.

Выяснился и еще один факт, состоящий в том, что при отсутствии теплового шума взвешенный шум от помех может быть приблизительно рассчитан с помощью простого выражения:

$$(S/I) = (C/X) + B_v, \quad (1)$$

где

S/I — отношение размаха сигнала изображения к взвешенному среднеквадратичному шуму от помех (дБ);

C/X — отношение полезного сигнала к мешающему (дБ);

B_v — коэффициент ослабления помех на видеочастотах (дБ).

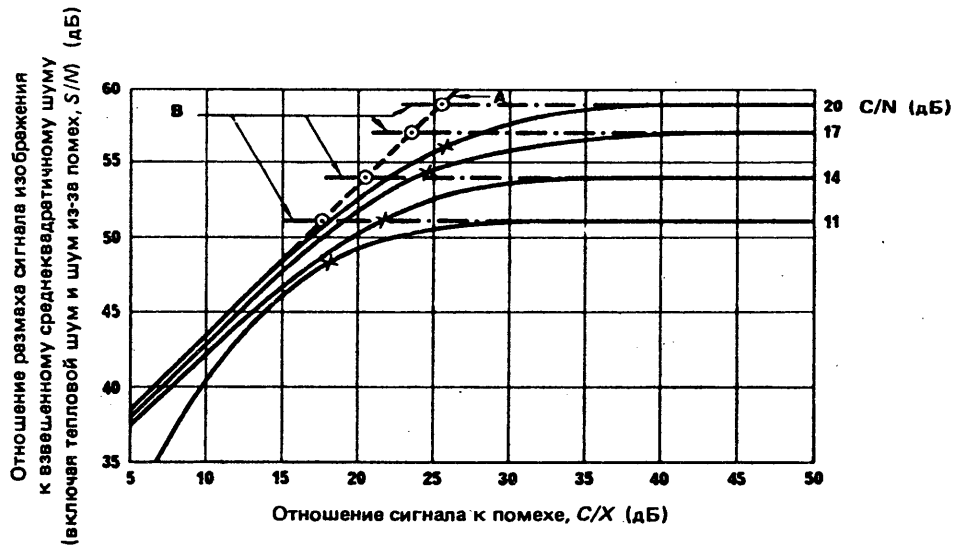


РИСУНОК 2

Объективные измерения телевизионного шума от помех при наличии теплового шума

Размах частоты мешающего сигнала, 24 МГц
 Размах частоты полезного сигнала, 24 МГц
 C/N = Отношение сигнал/шум

Кривая А: только помеха (экстраполяция)

Кривая В: только тепловой шум (экстраполяция)

Примечание.— При высоких значениях отношения сигнал/шум на входе шум на выходе обусловлен шумом в модуляторе и демодуляторе и другими ухудшениями при передаче.

× × × : измеренные точки ухудшения на 3 дБ из-за помехи

⊙ ⊙ ⊙ ⊙ : точки ухудшения на 3 дБ, выведенные эмпирически путем сложения мощностей отдельно взвешенных компонентов в основной полосе.

Для условий испытаний был найден коэффициент ослабления помехи, B_v , равный 33,5 дБ. (Отношения сигнала к помехе, S/I , были определены с помощью измеренных пиковых значений шума во временном интервале от 5 до 10 с, когда источник помех был активным, то есть не во время передачи испытательной таблицы и не во время коммерческих передач.)

На основе этих результатов и выводов, представленных в пункте 2, предлагается использовать следующее выражение для определения фактора ослабления помех, B_v , для других значений девиации частоты в диапазоне от 8 до 24 МГц.

$$B_v = 6 + 20 \log \Delta F, \quad (2)$$

где

ΔF : размах частоты полезного сигнала, МГц.

При наличии теплового шума общая взвешенная мощность шума в основной полосе равна суммарной мощности взвешенного шума от помех, определяемого выражением (1), и взвешенного теплового шума. Это также справедливо для отношений полезного сигнала к помехе, превышающих приблизительно 15 дБ. При меньших отношениях отношение сигнала к шуму начинает падать быстрее в связи с возрастанием чувствительности демодулятора к опрокидыванию фазы сигнала тепловым шумом.

4. Испытания, проведенные в СССР

В документах исследовательского периода 1966—1969 годов описывается обширная серия результатов измерений как объективного, так и субъективного характера. В целом эти результаты соответствуют результатам измерений, изложенным в пунктах 2.1 и 2.2.

5. Выводы

Общие выводы можно сделать только после дальнейшего изучения представленных результатов. Однако некоторые частные выводы состоят в следующем:

- для удовлетворения любых конкретных требований к качеству передачи необходимое защитное отношение приблизительно обратно пропорционально квадрату девиации частоты полезного сигнала;
- если полезный сигнал модулирован, то девиация частоты мешающего сигнала не очень влияет на результаты. Это дает возможность полагать, что результаты применимы также к помехам от ЧМ телефонного сигнала;
- можно считать, что в общем случае нет значения разноса несущих частот, при котором помехи гораздо больше, чем в совмещенном канале. Однако некоторые испытания свидетельствуют, что, когда несущие частоты разнесены на величину, близкую к цветовой поднесущей, уровни помех будут выше, чем при совмещенных частотах, как показано в пункте 2.3;
- объективные результаты для помех в совмещенном канале могут быть использованы в том случае, когда каждый источник помех вызывает помехи меньшие, чем воспринимаемые. В этом случае взвешенный шум из-за помех, рассчитанный с помощью коэффициента ослабления помех B_v , может быть суммирован с тепловым шумом в системе;
- субъективные результаты применимы в случаях, когда уровни помех более высоки, чем указано в предыдущем пункте, так как объективные результаты не учитывают тот факт, что при высоких уровнях помех субъективный эффект может быть более нежелательным, чем воздействие теплового шума.

РЕШЕНИЯ

РЕШЕНИЕ 87*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАЦИОННОЙ ЗОНЫ

(Приложение 28 Регламента радиосвязи)

(1989)

2, 4, 5, 8, 9, 10, 11-я Исследовательские комиссии МККР,

УЧИТЫВАЯ,

- (a) что Приложение 28 Регламента радиосвязи действует без изменений по существу с ВАКР-79;
- (b) что процедура, изложенная в Приложении 28, не может адекватно соответствовать требованиям цифровых методов передачи, использование которых резко возросло за последние годы;
- (c) что ВАКР-79 приняла Резолюцию № 60 с целью облегчить обновление Приложения 28, но только в отношении аспектов, касающихся условий распространения радиоволн;
- (d) что всеохватывающая программа измерения условий распространения помех (COST 210), как ожидается, даст новые необходимые данные по условиям распространения к 1991 году;
- (e) что может быть желательно обновить Приложение 28;
- (f) что для того, чтобы предпринять обновление Приложения 28, в первую очередь следует обновить соответствующие материалы МККР, для чего необходимо тесное сотрудничество между несколькими Исследовательскими комиссиями,

ПОСТАНОВЛЯЕТ:

1. предложить МКРЧ представить документ, описывающий его опыт и проблемы, возникающие в ходе применения Приложения 28, и содержащий любые предложения по возможному улучшению Приложения 28;
2. что для полного пересмотра текстов МККР, связанных с Приложением 28 Регламента радиосвязи, должна быть учреждена Объединенная временная рабочая группа, которая будет называться ОВРГ (координационная зона);
3. что ОВРГ (координационная зона) должна в 1993 году представить отчет 4-й Исследовательской комиссии и созвать в следующем исследовательском периоде МККР два собрания, время и место проведения которых устанавливаются Директором МККР после консультаций с председателями заинтересованных Исследовательских комиссий, принимая во внимание график проведения Всемирных административных конференций, которые получили бы полномочия предпринять обновление Приложения 28;

* В соответствии с решением Собрания председателей и вице-председателей (Женева, 4—6 июля 1990 г.) задачи ОВРГ 2-4-5-8-9-10-11/1 по определению координационной зоны переданы 12-й Исследовательской комиссии для изучения Целевой группой 12/3.

4. что работа ОВРГ (координационная зона) должна включать:
 - 4.1 обзор и, где необходимо, пересмотр методологий и критериев Приложения 28 в свете самых последних выводов Исследовательских комиссий и предложений МКРЧ;
 - 4.2 рассмотрение технических аспектов необходимости любого расширения сферы применения положений Приложения 28;
 - 4.3 использование самых последних данных об условиях распространения радиоволн, представленных МККР и/или администрациями, в том числе соответствующих результатов из программы COST 210;
 5. что эта работа должна завершиться подготовкой всеохватывающего текста, который может послужить основой для обновления Приложения 28 на компетентной Всемирной административной конференции;
 6. что базой для текста, который предстоит разработать в соответствии с пунктом 5 раздела "ПОСТАНОВЛЯЕТ", выше, должны быть Рекомендации 359 и 620 МККР и Отчет 382;
 7. что председательствовать в ОВРГ (координационная зона) будет г-н Х. Вайсс (США) и что членами ОВРГ будут: Канада, Китайская Народная Республика, Дания, Испания, США, Франция, Греция, Индия, Иран, Италия, Япония, Новая Зеландия, Соединенное Королевство, Швеция, Швейцария, СССР, ЕРС, ИНТЕЛСАТ;
 8. что работа ОВРГ (координационная зона) должна проводиться, по возможности, путем переписки и осуществляться в рамках обычного бюджета МСЭ.
-

