

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.617-2
(02/2012)

**Методы прогнозирования и данные о
распространении радиоволн,
необходимые для проектирования
тропосферных радиорелейных систем**

Серия Р
Распространение радиоволн



Международный
союз
электросвязи

Предисловие

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

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

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

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

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

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

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

Электронная публикация
Женева, 2012 г.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.617-2*

**Методы прогнозирования и данные о распространении радиоволн,
необходимые для проектирования тропосферных радиорелейных систем**

(Вопрос МСЭ-R 205/3)

(1986-1992-2012)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что для надлежащего планирования тропосферных радиорелейных систем необходимо иметь соответствующие данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования;
- b) что разработаны методы, позволяющие прогнозировать большинство наиболее важных параметров распространения, необходимых для планирования тропосферных радиорелейных систем;
- c) что по мере возможности эти методы проходили проверку с помощью имеющихся данных измерений, которая показала, что они отличаются точностью, сопоставимой с природой изменчивостью явлений распространения радиоволн и достаточной для большинства существующих применений при планировании систем,

рекомендует,

чтобы для использования при планировании тропосферных радиорелейных систем в соответствующих диапазонах указанных параметров были приняты методы прогнозирования и другие процедуры, изложенные в Приложении 1.

Приложение 1

1 Введение

Единственные механизмы тропосферного распространения радиоволн, которые постоянно наблюдаются на частотах выше 30 МГц, – это дифракция на поверхности Земли и рассеяние от атмосферных неоднородностей. Ослабление дифрагированных сигналов очень быстро возрастает с расстоянием и частотой, и, в конечном счете, основным механизмом распространения будет тропосферное рассеяние. Оба механизма могут использоваться для установления "загоризонтной" радиосвязи. Из-за несхожести двух названных механизмов при прогнозировании потерь передачи необходимо отдельно рассматривать трассы с дифракцией и трассы тропосферного рассеяния.

Настоящее Приложение посвящено вопросам проектирования тропосферных радиорелейных систем. Одна из его целей – в краткой форме представить простые методы прогнозирования годовых распределений и распределений для наихудшего месяца потерь передачи за счет тропосферного рассеяния, а так же информацию о диапазонах применимости этих распределений. Другая задача – изложить остальную информацию и описать методы, которые можно рекомендовать для использования при планировании тропосферных систем.

* В 2000 году 3-я Исследовательская комиссия по радиосвязи внесла в настоящую Рекомендацию редакционные поправки в соответствии с Резолюцией МСЭ-R 44.

2 Потери передачи на трассах, подверженных дифракции

Для радиотрасс, длина которых лишь немного превышает расстояние до горизонта, или для трасс, проходящих над препятствием или над горной местностью, дифракция будет основным способом распространения, определяющим напряженность поля. В этих случаях следует применять методы, описанные в Рекомендации МСЭ-R P.526.

3 Распределение потерь передачи для трасс тропосферного рассеяния

Уровни сигналов, распространяющихся за счет тропосферного рассеяния, испытывают как быстрые, так и медленные колебания. Медленные колебания обусловлены общими изменениями условий рефракции в атмосфере, а быстрые замирания – движением мелкомасштабных неоднородностей. Медленные колебания хорошо описываются распределениями часовых медианных потерь передачи, которые являются приблизительно лог-нормальными со стандартными отклонениями от 4 до 8 дБ, в зависимости от климатических условий. Быстрые колебания с периодами примерно до 5 минут приближенно соответствуют распределению Рэлея.

При определении характеристик загоризонтных линий связи, имеющих такую геометрию, при которой преобладает механизм тропосферного рассеяния, естественно оценивать распределение часовых медианных потерь передачи для процентов времени непревышения, больших 50%. Простой полуаналитический метод прогнозирования распределения среднегодовых потерь передачи в указанном диапазоне приведен в пункте 3.1. Графический метод перевода годовых процентов времени в проценты времени для среднего наихудшего месяца можно найти в пункте 3.2. И наконец, в пункте 3.3 дается руководство по оценке распределения потерь передачи для малых процентов времени, которые можно использовать для определения необходимых динамических диапазонов приемника. В Дополнение 1 включена дополнительная информация, касающаяся сезонных и суточных изменений потерь передачи, частоты быстрых замираний для трасс тропосферного рассеяния и ширины полосы передачи.

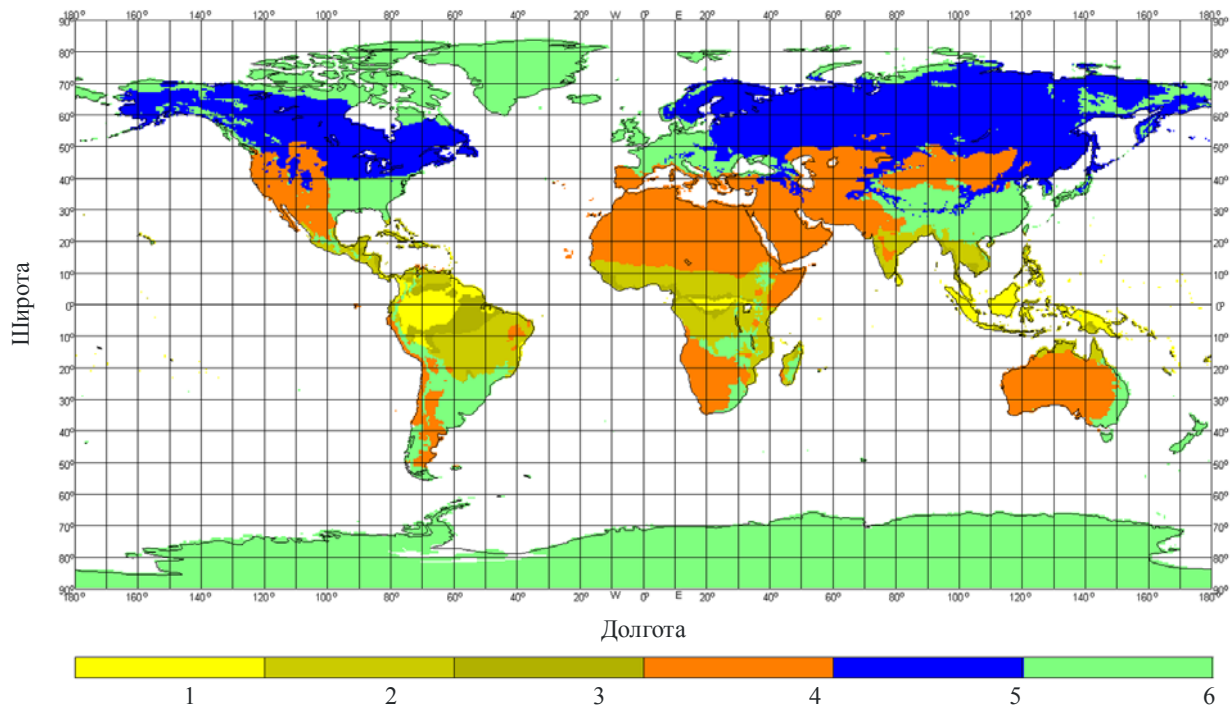
3.1 Распределение среднегодовых медианных потерь передачи для процентов времени, больших 50%

Для оценки среднегодовых медианных потерь передачи, $L(q)$, не превышаемых для процентов времени q , больших 50%, рекомендуется использовать следующую пошаговую процедуру. Входными параметрами процедуры являются: длина трассы по дуге большого круга, d (км), частота, f (МГц), усиление антенны передатчика, G_t (дБ), усиление антенны приемника, G_r (дБ), угол горизонта со стороны передатчика, θ_t (мрад), и угол горизонта со стороны приемника, θ_r (мрад):

Шаг 1: Определить наиболее подходящий тип климата для общего объема, занимаемого рассматриваемой линией, с использованием климатической карты, которая изображена на рисунке 1. Данную карту можно получить в электронной форме на веб-сайте ИКЗ МСЭ-R по ссылке "Программное обеспечение в области ионосферного и тропосферного распространения радиоволн и радишума".

РИСУНОК 1

Классификация климатических зон



P.0617-01

Если общий объем тропосферного рассеяния находится над морем, то типы климатов в местах расположения передатчика и приемника определены. Если оба оконечных устройства находятся в климатической зоне, соответствующей точке на суше, то климатическая зона трассы задается меньшим из значений климатических зон передатчика и приемника. Если только одно оконечное устройство находится в климатической зоне, соответствующей точке на суше, то эта зона определяет климатическую зону трассы. Если ни одно из оконечных устройств не находится в климатической зоне, соответствующей точке на суше, то трассе присваивается климатическая зона "морская трасса".

Шаг 2: Для выбранного климата с помощью таблицы 1 получить метеорологический параметр и параметры структуры атмосферы, M и γ , соответственно, а также уравнение, которое должно использоваться для расчета $Y(90)$.

ТАБЛИЦА 1

Значения метеорологических параметров и параметров структуры атмосферы

Климат	1	2	3	4	5	6	Морской
M (дБ)	39,60	29,73	19,30	38,50	29,73	33,20	26,00
γ (км ⁻¹)	30,33	20,27	10,32	30,27	20,27	30,27	20,27
Уравнение $Y(90)$	9	7	10	11	7	7	8

Шаг 3: Вычислить угол рассеяния θ (угловое расстояние) по формуле:

$$\theta = \theta_e + \theta_t + \theta_r \quad \text{мрад,} \quad (1)$$

где θ_t и θ_r – углы горизонта со стороны передатчика и приемника, соответственно, а

$$\theta_e = d \cdot 10^3 / ka \quad \text{мрад,} \quad (2)$$

где:

d : длина трассы (км);

$a = 6370$ км радиус Земли;

k : коэффициент эквивалентного радиуса Земли для средних условий рефракции (следует использовать значение $k = 4/3$, если нет более точных данных).

Шаг 4: Определить зависимость потерь передачи, L_N , от высоты общего объема по формуле:

$$L_N = 20 \log(5 + \gamma H) + 4,34 \gamma h \quad \text{дБ}, \quad (3)$$

где:

$$H = 10^{-3} \theta d / 4 \quad \text{км}, \quad (4)$$

$$h = 10^{-6} \theta^2 k a / 8 \quad \text{км} \quad (5)$$

и γ – параметр структуры атмосферы, определенный на шаге 2.

Шаг 5: Определить коэффициент преобразования, $Y(q)$, для процента времени неперевышения q , отличного от 50%, по формуле:

$$Y(q) = C(q) Y(90) \quad \text{дБ}. \quad (6)$$

Здесь $Y(90)$ – коэффициент преобразования для $q = 90\%$, определяемый для рассматриваемого климата соответствующим уравнением (7–11), как указано в таблице 1:

$$Y_{90} = -2,2 - [8,1 - 2,3 \cdot 10^{-4} \min(1000f, 4000)] \exp(-0,137h) \quad (7)$$

$$Y_{90} = -9,5 - 3 \exp(-0,137h) \quad (8)$$

$$Y_{90} = -8,2 \quad d_s < 100 \quad (9a)$$

$$Y_{90} = 1,006 \cdot 10^{-8} d_s^3 + 2,569 \cdot 10^{-5} d_s^2 + 0,224 d_s - 10,2 \quad 100 \leq d_s < 1000 \quad (9b)$$

$$Y_{90} = -3,4 \quad \text{в иных случаях} \quad (9c)$$

$$Y_{90} = -10,845 \quad d_s < 100 \quad (10a)$$

$$Y_{90} = -4,5 \cdot 10^{-7} d_s^3 + 4,45 \cdot 10^{-4} d_s^2 + 0,122 d_s - 2,645 \quad 100 \leq d_s < 550 \quad (10b)$$

$$Y_{90} = -4,0 \quad \text{в иных случаях} \quad (10c)$$

$$Y_{90} = -11,5 \quad d_s < 100 \quad (11a)$$

$$Y_{90} = -8,519 \cdot 10^{-8} d_s^3 + 7,444 \cdot 10^{-5} d_s^2 + 4,18 \cdot 10^{-4} d_s - 12,1 \quad 100 \leq d_s < 465 \quad (11b)$$

$$Y_{90} = -8,4 \quad \text{в иных случаях.} \quad (11c)$$

Коэффициент $C(q)$ для искомого процента времени не превышения можно определить по таблице 2.

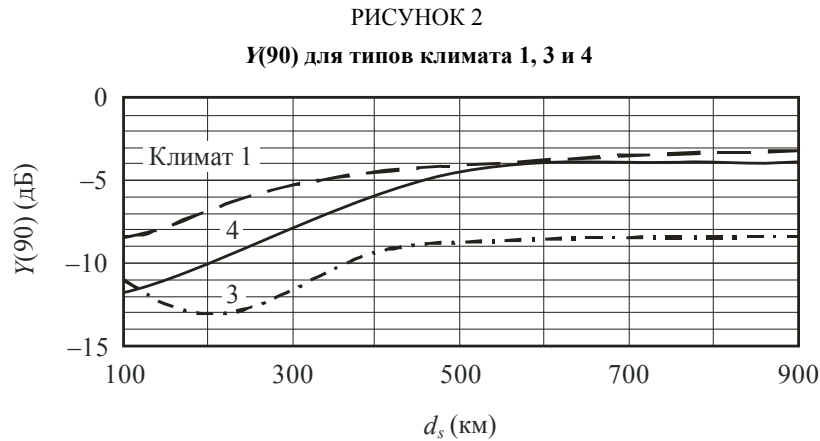


Таблица 2
Некоторые значения $C(q)$

q	50	90	99	99,9	99,99
$C(q)$	0	1	1,82	2,41	2,90

Шаг 6: Определить потери связи между раскрывом антенны и средой распространения, L_c :

$$L_c = 0,07 \exp [0,055(G_t + G_r)] \quad \text{дБ}, \quad (12)$$

где G_t и G_r – коэффициенты усиления антенны.

Шаг 7: Определить среднегодовые потери передачи, не превышаемые для процента времени $q\%$ по формуле:

$$L(q) = M + 30 \log f + 10 \log d + 30 \log \theta + L_N + L_c - G_t - G_r - Y(q) \quad \text{дБ}. \quad (13)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Уравнение (13) является эмпирической формулой, основанной на данных для частотного диапазона между 200 МГц и 4 ГГц. Для большинства применений его можно использовать и на частоте 5 ГГц без особого ущерба для точности.

3.2 Распределение медианных потерь передачи за средний наихудший месяц для процентов времени, больших 50%

Для согласованности с распределением среднегодовых потерь передачи это распределение целесообразнее определять по среднегодовому, используя при этом коэффициент преобразования. Процедура сводится к следующему:

Шаг 1: Получить среднегодовое распределение для процентов времени не превышения (50, 90, 99, 99,9) и выбранного типа(ов) климата с помощью метода, изложенного в пункте 3.1.

Шаг 2: По кривым рисунка 3 определить разность основных потерь передачи между среднегодовыми распределениями и распределениями для среднего наихудшего месяца. Поскольку для типа климата 2 таких кривых нет, в этом случае следует использовать кривые для типа климата 3.

Шаг 3: Для оценки потерь передачи в средний наихудший месяц, не превышаемых для процентов времени (50, 90, 99, 99,9), к разности, полученной на шаге 2, прибавить соответствующие среднегодовые значения, найденные на шаге 1.

Шаг 4: Потери передачи для среднего наихудшего месяца, не превышаемые в течение 99,99% времени, можно оценить по найденным выше значениям, применив логарифмическую экстраполяцию (т. е. по графику, построенному на нормально-вероятностной бумаге).

3.3 Среднегодовое распределение медианных потерь передачи для процентов времени, меньших 50%

Для процентов времени между 20% (для некоторых типов сухого климата над сушей от 1%) и 50% среднегодовое распределение потерь передачи можно считать симметричным, и значения потерь передачи можно определить по соответствующим значениям выше медианных, т. е.

$$L(20\%) = L(50\%) - [L(80\%) - L(50\%)]. \quad (14)$$

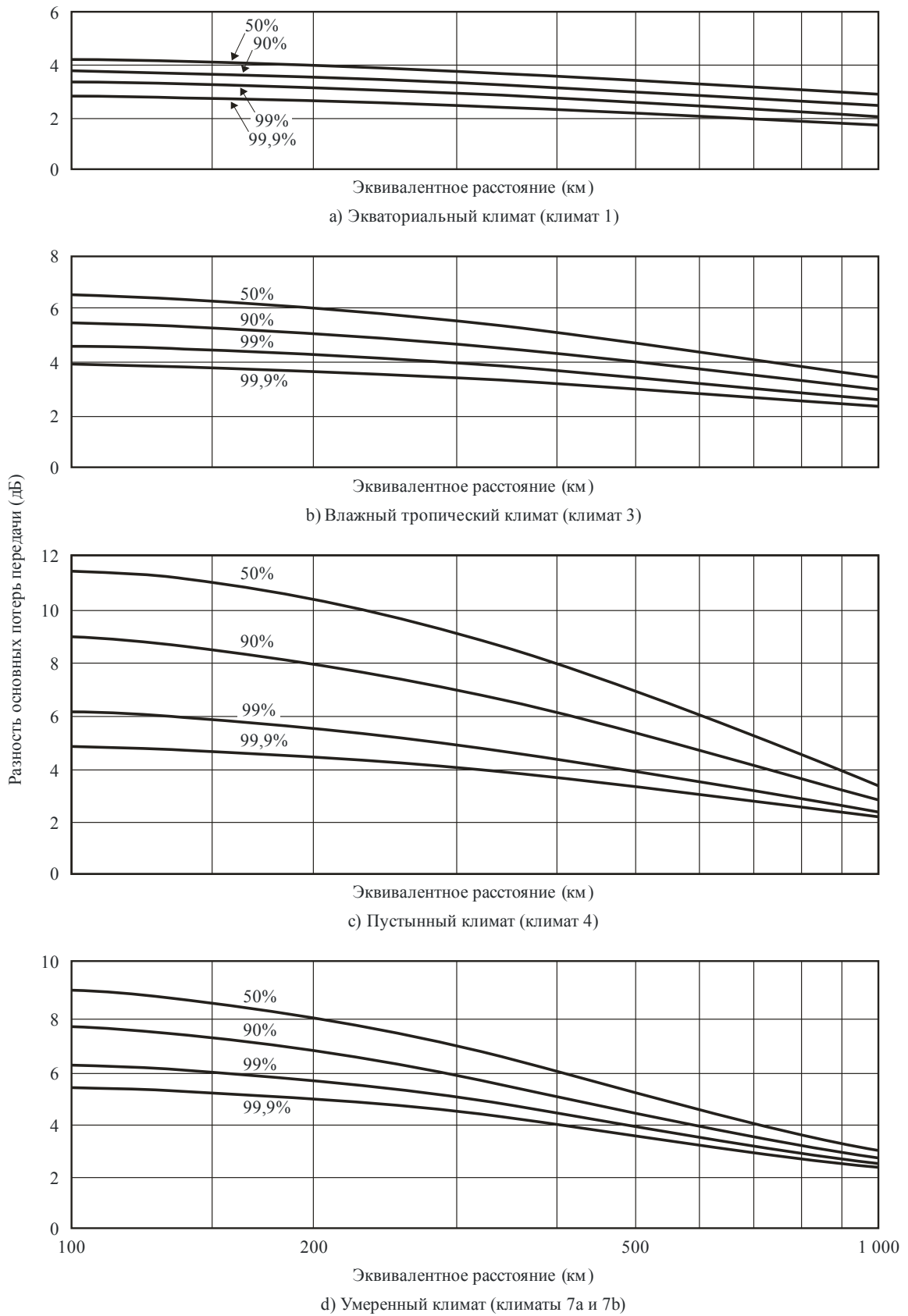
Однако для расчета динамического диапазона, требующего знания распределения для более низких процентов времени, нельзя ограничиваться только тропосферным рассеянием. Значения потерь передачи, не превышаемых для очень малых процентов времени, будут определяться механизмом волноводного распространения. Эти значения целесообразнее оценивать с помощью метода, изложенного в Рекомендации МСЭ-R P.452.

4 Разнесенный прием

Глубокие замирания, возникающие при распространении за счет тропосферного рассеяния, сильно ухудшают работоспособность систем, использующих этот механизм распространения. Влияние замираний можно уменьшить с помощью разнесенного приема, используя два или более сигнала, замирания которых более или менее независимы за счет разнесения трасс или частот. Итак, известно, что пространственное, угловое или частотное разнесение уменьшает процент времени, в течение которого превышаются большие значения потерь передачи. При этом угловое разнесение может оказывать такой же эффект, что и вертикальное пространственное, являясь при этом более экономичным.

РИСУНОК 3

Кривые разности между основными потерями передачи для наихудшего месяца и годовыми основными потерями передачи



4.1 Пространственное разнесение

В зависимости от особенностей рассматриваемого места можно использовать пространственное разнесение по горизонтали или вертикали. Соответствующие величины разноса Δh и Δv по горизонтали и вертикали, соответственно, на частотах выше 1000 МГц определяются с помощью эмпирических соотношений:

$$\Delta h = 0,36 (D^2 + 4I_h^2)^{1/2} \quad \text{м,} \quad (15)$$

$$\Delta v = 0,36 (D^2 + 4I_v^2)^{1/2} \quad \text{м,} \quad (16)$$

где D – диаметр антенны в метрах, а $I_h = 20$ м и $I_v = 15$ м – эмпирические масштабные длины по горизонтали и вертикали, соответственно.

4.2 Разнесение по частоте

В системах, в которых желательно использовать разнесение по частоте, соответствующая величина частотного разноса Δf (МГц) на частотах выше приблизительно 1000 МГц определяется с помощью соотношения:

$$\Delta f = (1,44 f / \theta d) (D^2 + I_v^2)^{1/2} \quad \text{МГц,} \quad (17)$$

где:

- f : частота (МГц);
- D : диаметр антенны (м);
- θ : угол рассеяния (мрад), получаемый из уравнения (1);
- $I_v = 15$ м масштабная длина, о которой говорилось выше.

4.3 Угол разнесение

Можно также использовать вертикальное угловое разнесение с двумя или более антенными облучателями, разнесенными в вертикальном направлении, и общим отражателем. Такой прием создает различные разнесенные по вертикали общие объемы по аналогии с вертикальным пространственным разнесением. Угловой разнос $\Delta \theta_r$, необходимый для получения приблизительно такого же эффекта, как за счет вертикального пространственного разноса Δv (м), определяемого из уравнения (16), на приблизительно симметричных трассах рассчитывается как:

$$\Delta \theta_r = \arctan (\Delta v / 500d), \quad (18)$$

где d – длина трассы (км).

5 Влияние расположения станций

К расположению линий передачи следует относиться очень внимательно. Лучи антенны не должны преграждаться близлежащими препятствиями, а антенны должны быть направлены немного выше горизонта. Точное оптимальное значение возвышения зависит от типа трассы и атмосферных условий, но оно должно быть в пределах от 0,2 до 0,6 ширины луча над горизонтом.

Измерения, проведенные с помощью поворота луча антенны с усилением 53 дБ относительно направления на горизонт по дуге большого круга от двух передатчиков, работающих на частоте 2 ГГц, каждый из которых находится на расстоянии 300 км, с очевидностью продемонстрировали скорость снижения мощности принимаемого сигнала 9 дБ на градус. Это наблюдалось при увеличении угла рассеяния выше первых трех градусов, как по азимуту, так и по возвышению, для каждой трассы и для широкого диапазона процентов времени.

Дополнение 1

Дополнительные вспомогательные материалы

1 Сезонные и суточные изменения потерь передачи

В умеренных климатических зонах происходят годовые и суточные изменения потерь передачи. Среднемесячные медианные потери, как правило, выше зимой, чем летом. Диапазон потерь составляет от 10 до 15 дБ на сухопутных трассах длиной 150–250 км, но снижаются с ростом расстояния. Как показали измерения, выполненные в европейской части Российской Федерации на трассе длиной 920 км на частоте 800 МГц, разница между летним и зимним медианными значениями составила лишь 2 дБ. Суточные изменения больше всего заметны летом и лежат в диапазоне от 5 до 10 дБ на сухопутных трассах длиной от 100 до 200 км. Наибольшие потери передачи наблюдаются после полудня, а наименьшие – ранним утром. На морских трассах появление суперрефракции и поднятых уровней более вероятно, чем на сухопутных трассах, поэтому на них больше и диапазон изменений. Это соображение может относиться также к низким, ровным прибрежным регионам в морских зонах.

В сухих, жарких пустынных климатических зонах ослабление достигает максимума летом. Годовые изменения месячных медианных значения для трасс средней дальности превышает 20 дБ, при этом суточные изменения чрезвычайно большие.

В экваториальных климатических зонах годовые и суточные изменения, как правило, небольшие.

В муссонных климатических зонах, где проводились измерения (Сенегал и Барбадос), максимальные значения N_s наблюдаются во время сезона дождей, но минимальное ослабление – между сезоном дождей и сухим сезоном.

2 Частота быстрых замираний для трасс тропосферного рассеяния

Быстрое замирание происходит с частотой несколько замираний в минуту на более низких частотах и несколько герц в диапазоне УВЧ. В результате наложения множества переменных неоднородных компонентов образуется сигнал, амплитуда которого имеет рэлеевское распределение. Установлено, что это почти справедливо, когда анализируется распределение за периоды примерно до 5 минут. Если существенную часть принимаемого сигнала составляют сигналы другого типа, то это распределение меняется. Отмечались внезапные быстрые и глубокие замирания при прохождении линии связи через область фронтального возмущения. Ярко выраженные быстрые замирания могут вызывать отражения от воздушного судна.

Проводилось исследование частоты быстрых замираний как функции автокорреляции по времени, которая дает среднюю частоту замираний для коротких периодов времени, в течение которых сигнал является стационарным. Установлено, что медианное значение средней частоты замираний растет почти пропорционально длине трассы и несущей частоте и немного уменьшается с увеличением диаметра антенны.

Измерения также показали, что наибольшая быстрота замираний наблюдается в случаях, когда часовые медианные потери передачи превышают медианные потери за длительный период. В целом было установлено, что скорость замираний уменьшается с уменьшением потерь передачи ниже уровня медианных потерь за длительный период. При этом наименьшие скорости замираний наблюдаются в случаях, когда преобладает волноводное распространение.

Самое большое значение имеют наиболее быстрые замирания в случае часовых медианных значений потерь передачи, превышающих медианные потери за длительный период. Согласно результатам нескольких известных измерений (на частоте 2 ГГц) медианные скорости замираний составляют приблизительно от 20 до 30 замираний в минуту.

3 Ширина полосы, доступная для передачи

Различные неоднородности, обуславливающие распространение за счет рассеяния, создают трассы распространения, которые могут различаться по количеству и времени передачи. Соответственно, коэффициенты передачи на двух соседних частотах не полностью коррелированы, что приводит к искажениям передаваемого сигнала. Доступная для передачи ширина полосы – это ширина полосы, в пределах которой искажение передаваемого сигнала, вызванное этим явлением, находится в допустимых пределах. Таким образом, данная ширина полосы зависит как от характера передаваемого сигнала (мультиплексированный телефонный сигнал, телевизионное изображение и т. д.), так и от искажения, допустимого для данного сигнала. Как показали исследования, проведенные во Франции:

- повышение усиления антенны расширяет доступную для передачи ширину полосы до такой степени, что потери усиления также повышаются (т. е. при уровнях усиления, превышающих примерно 30 дБ);
 - при всех остальных одинаковых параметрах доступная для передачи ширина полосы зависит от структуры атмосферы и, следовательно, от рассматриваемой климатической зоны;
 - доступная для передачи ширина полосы уменьшается с увеличением расстояния, но закон этого уменьшения для разных климатических зон разный;
 - доступная для передачи ширина полосы уменьшается при положительных углах выхода волн и увеличивается при отрицательных углах.
-