

**МСЭ-R**

Сектор радиосвязи МСЭ

**Рекомендация МСЭ-R P.530-16**  
(07/2015)

**Данные о распространении радиоволн  
и методы прогнозирования,  
требующиеся для проектирования  
наземных систем прямой видимости**

**Серия Р**  
**Распространение радиоволн**



## 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 МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-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	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	<b>Распространение радиоволн</b>
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

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

Электронная публикация  
Женева, 2016 г.

© ITU 2016

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

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.530-16

**Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости**

(Вопрос МСЭ-R 204/3)

(1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2015)

**Сфера применения**

Настоящая Рекомендация содержит методы прогнозирования явлений, связанных с распространением радиоволн, которые должны приниматься во внимание при проектировании систем фиксированных цифровых линий связи, работающих в пределах прямой видимости, в условиях как ясной, так и дождливой погоды. В ней также предоставляются в виде четких пошаговых процедур руководящие принципы проектирования линии связи, включая использование методов, позволяющих сводить к минимуму помехи распространению радиоволн. Окончательный прогнозируемый сбой служит основой для других Рекомендаций, в которых рассматриваются вопросы ошибок в показателях качества и готовности.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a)* что для правильного планирования наземных систем прямой видимости необходимо иметь соответствующие методы прогнозирования и данные о распространении радиоволн;
- b)* что разработаны методы, которые позволяют прогнозировать некоторые наиболее важные параметры распространения радиоволн, влияющие на планирование наземных систем, работающих в пределах прямой видимости;
- c)* что по мере возможности проводилась проверка этих методов на имеющихся данных измерений, которая показала, что их точность соизмерима с природной изменчивостью явлений распространения радиоволн, а также соответствует большей части применений в системе планирования,

*рекомендует,*

**1** чтобы для планирования наземных систем прямой видимости в соответствующих диапазонах указанных параметров были приняты методы прогнозирования и другие методы, представленные в Приложении 1.

**Приложение 1****1 Введение**

При проектировании радиорелейных систем прямой видимости следует учитывать ряд явлений, связанных с распространением радиоволн, включая следующие:

- дифракционное замирание, обусловленное закрытием трассы наземными препятствиями при неблагоприятных условиях распространения радиоволн;
- затухание в атмосферных газах;
- замирания, обусловленные многолучевым распространением в атмосфере или расхождением лучей (обычно называемым дефокусировкой лучей), которые связаны с существованием аномальных слоев рефракции;
- замирания, обусловленные многолучевостью, возникающей вследствие отражения от поверхности;

- затухание, обусловленное осадками или твердыми частицами в атмосфере;
- колебания угла прихода радиоволн на приемном терминале и угла выхода радиоволн на передающем терминале, обусловленные рефракцией;
- уменьшение избирательности по кроссполяризации (XPD) в условиях многолучевости или при наличии осадков;
- искажение сигнала, обусловленное частотно-избирательными замираниями и запаздыванием в условиях многолучевого распространения.

Одна из целей настоящего Приложения заключается в том, чтобы в сжатой последовательной форме представить простые методы прогнозирования явлений распространения радиоволн, которые необходимо учитывать при проектировании большинства фиксированных линий связи прямой видимости, а также предоставить информацию о диапазонах их применимости. Другая цель, которую преследует данное Приложение, – это представить дополнительную информацию и методы, которые можно рекомендовать для использования в процессе планирования наземных систем прямой видимости.

Методы прогнозирования, разработанные для территорий конкретных администраций с учетом их специфических климатических и топографических особенностей, могут иметь определенные преимущества по сравнению с изложенными в настоящем Приложении.

За исключением помех, являющихся следствием уменьшения XPD, в настоящем Приложении рассматривается только влияние на полезный сигнал. Некоторые общие соображения относительно внутрисистемных помех в цифровых системах изложены в п. 2.3.6, однако более детально этот вопрос не обсуждается. Другие аспекты влияния помех рассматриваются в отдельных Рекомендациях, а именно:

- в Рекомендации МСЭ-R P.452 рассматриваются межсистемные помехи, связанные с другими наземными линиями и земными станциями;
- в Рекомендации МСЭ-R P.619 рассматриваются межсистемные помехи, возникающие из-за работы космических станций.

Чтобы сделать это Приложение наиболее полезным для планирования и проектирования систем, вся информация расположена в соответствии с рассматриваемыми явлениями распространения радиоволн, а не согласно физическим механизмам, вызывающим эти явления.

Следует отметить, что понятие "наихудший месяц", используемое в настоящей Рекомендации, эквивалентно понятию "любой месяц" (см. Рекомендацию МСЭ-R P.581).

## 2 Потери при распространении радиоволн

Потери при распространении радиоволн на наземной трассе прямой видимости, по отношению к потерям в свободном пространстве (см. Рекомендацию МСЭ-R P.525), являются суммой различных составляющих, таких как:

- затухание в атмосферных газах;
- дифракционные замирания, обусловленные закрытием или частичным закрытием трассы;
- замирание, обусловленное многолучевостью, расширением луча и мерцанием;
- затухание, обусловленное колебанием угла прихода/выхода;
- затухание, обусловленное осадками;
- затухание, обусловленное песчаными и пылевыми бурями.

Каждая из этих составляющих имеет свои характеристики, зависящие от частоты, длины трассы и географического местоположения. Они будут описаны в следующих пунктах.

Иногда интерес представляет явление усиления сигнала при распространении. В таких случаях оно рассматривается вслед за соответствующими потерями распространения.

## 2.1 Затухание в атмосферных газах

Некоторое затухание, вызываемое поглощением в кислороде и водяных парах, всегда присутствует и должно учитываться при расчете общих потерь при распространении радиоволн на частотах выше примерно 10 ГГц. Затухание на трассе длиной  $d$  (км) вычисляется по формуле:

$$A_a = \gamma_a d \quad \text{дБ.} \quad (1)$$

Погонное затухание  $\gamma_a$  (дБ/км) должно быть определено из Рекомендации МСЭ-R P.676.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – На длинных трассах на частотах выше примерно 20 ГГц может оказаться желательным учесть известные статистические данные по плотности водяных паров и температуре вблизи трассы. Некоторая информация о плотности водяных паров приводится в Рекомендации МСЭ-R P.836.

## 2.2 Дифракционные замирания

Изменения условий рефракции в атмосфере вызывают отклонения эквивалентного радиуса Земли или коэффициента  $k$  от его медианного значения, равного приблизительно  $4/3$  для стандартной атмосферы (см. Рекомендацию МСЭ-R P.310). В условиях достаточно большой атмосферной субрефракции (большие положительные значения градиента индекса рефракции, низкие значения коэффициента  $k$ ) траектория луча отклоняется таким образом, что Земля как бы закрывает прямую трассу между передатчиком и приемником, в результате чего и возникают замирания, называемые дифракционными. Такие замирания являются фактором, определяющим высоту антенны.

Статистические данные о коэффициенте  $k$  в одной точке можно получить из измерений или результатов прогноза градиента индекса рефракции в пределах первых 100 м атмосферы (см. Рекомендацию МСЭ-R P.453 о влиянии рефракции). Полученные значения градиента следует усреднить, чтобы получить эффективное значение  $k$  для рассматриваемой длины трассы,  $k_e$ . Значения  $k_e$ , превышаемые в течение 99,9% времени, обсуждаются в следующем пункте с точки зрения критерия просвета трассы.

### 2.2.1 Зависимость дифракционных потерь от просвета трассы

Дифракционные потери зависят от типа местности и растительности. При заданном просвете трассы дифракционные потери будут варьироваться от минимального значения в случае единичного клиновидного препятствия до максимального в случае гладкой сферической Земли. Методы расчета дифракционных потерь для двух этих случаев, а также для трасс над пересеченной местностью обсуждаются в Рекомендации МСЭ-R P.526. Верхний и нижний пределы дифракционных потерь показаны на рисунке 1.

Дифракционные потери над средней местностью, если их величина превышает приблизительно 15 дБ, можно аппроксимировать следующей формулой:

$$A_d = -20h/F_1 + 10 \quad \text{дБ,} \quad (2)$$

где  $h$  – разница высот (в метрах) между наиболее значительным препятствием на трассе и ее траекторией ( $h$  имеет отрицательное значение, если верхняя часть рассматриваемого препятствия находится выше фактической линии прямой видимости), а  $F_1$  – радиус первого эллипсоида Френеля, определяемый по формуле:

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad \text{м,} \quad (3)$$

где:

$f$ : частота (ГГц);

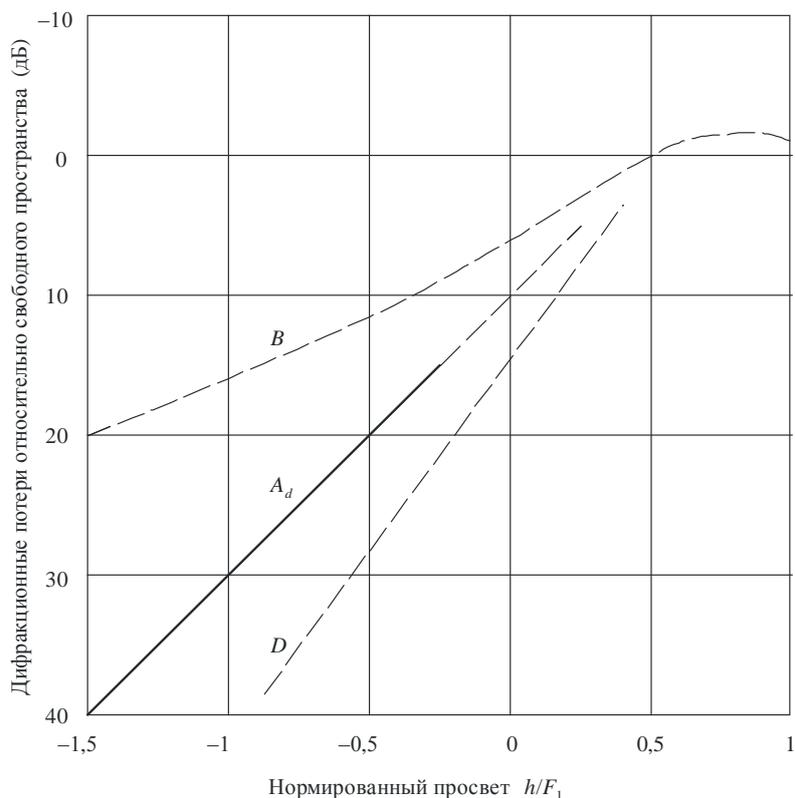
$d$ : длина трассы (км);

$d_1$  и  $d_2$ : расстояния (км) от терминалов до препятствия на трассе.

На рисунке 1 показана также кривая, основанная на уравнении (2) и обозначенная как  $A_d$ . Эта кривая, которая, строго говоря, справедлива для потерь, превышающих 15 дБ, в интересах проектировщиков линий связи была экстраполирована для значений потерь до 6 дБ.

РИСУНОК 1

**Дифракционные потери для микроволновых радиотрасс  
прямой видимости с препятствиями**



- B*: теоретическая кривая потерь в случае клиновидного препятствия  
*D*: теоретическая кривая потерь в случае гладкой сферической Земли на частоте 6,5 ГГц и  $k_e = 4/3$   
*A<sub>d</sub>*: эмпирическая кривая дифракционных потерь, основанная на уравнении (2) в случае средней местности  
*h*: величина, определяющая просвет радиотрассы над земной поверхностью  
*F<sub>1</sub>*: радиус первой зоны Френеля

P.0530-01

### 2.2.2 Критерии планирования просвета трассы

С дифракционными потерями такого типа на частотах свыше 2 ГГц в прошлом боролись с помощью достаточно высоких антенн, так чтобы при максимальном искривлении луча приемник не оказывался в зоне дифракции в том случае, если эквивалентный радиус Земли был меньше его обычного значения. Согласно теории дифракции условия распространения радиоволн в свободном пространстве обеспечиваются в том случае, если просвет над земной поверхностью для прямой трассы между передатчиком и приемником составляет не менее 60% радиуса первой зоны Френеля. В последнее время, когда накопилось больше информации об этом механизме и статистических данных о  $k_e$ , необходимых для статистических прогнозов, некоторые администрации стали устанавливать антенны на высотах, при которых происходят перебои в работе в небольших известных пределах.

В условиях отсутствия общей процедуры, которая позволяла бы прогнозировать дифракционные потери для различных небольших процентов времени, а следовательно, определять статистический критерий просвета трассы, рекомендуется воспользоваться следующей процедурой для умеренного и тропического климата.

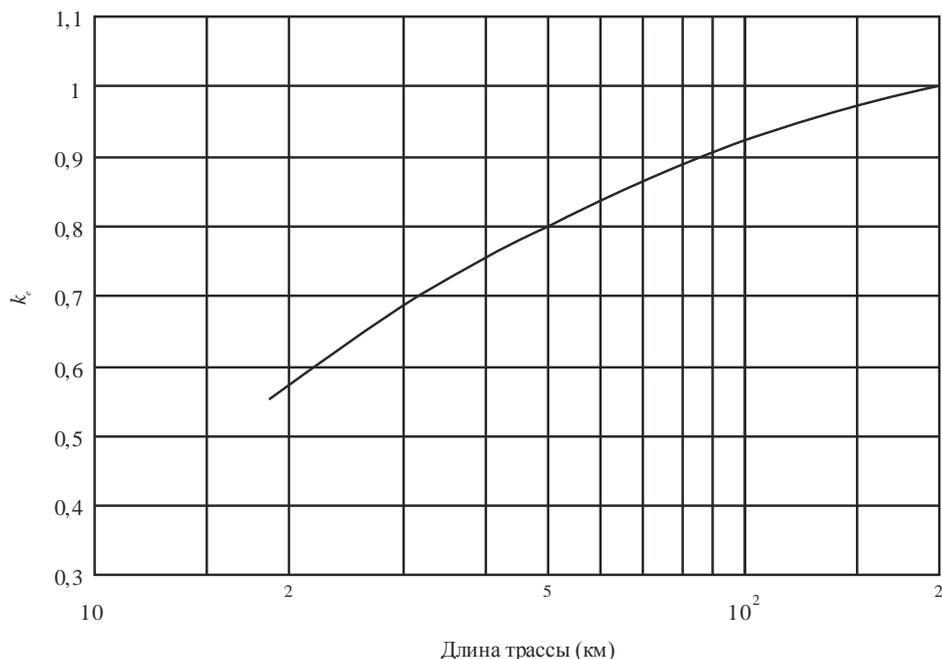
### 2.2.2.1 Антенные конфигурации без разнесения

*Шаг 1:* Определить высоту антенн, требуемую для обеспечения соответствующего медианного (точечного) значения коэффициента  $k$  (см. п. 2.2; при отсутствии каких-либо данных используется значение  $k = 4/3$ ) и просвета  $1,0 F_1$  над самым высоким препятствием (умеренный и тропический климат).

*Шаг 2:* По рисунку 2 определить значение  $k_e$  для рассматриваемой длины трассы.

РИСУНОК 2

Значение  $k_e$ , превышаемое приблизительно для 99,9% наихудшего месяца  
(умеренный континентальный климат)



P.0530-02

*Шаг 3:* Рассчитать высоту антенн, требуемую для обеспечения значения  $k_e$ , полученного на шаге 2, и следующие радиусы просвета в зоне Френеля:

Умеренный климат	Тропический климат
0,0 $F_1$ (т. е. скольжение), если на трассе имеется единичное изолированное препятствие 0,3 $F_1$ , если препятствие на трассе простирается вдоль ее части	0,6 $F_1$ для трасс, длина которых больше примерно 30 км

*Шаг 4:* Использовать большее из значений высоты антенн, полученных на шагах 1 и 3 (см. Примечание 1).

В тех случаях, когда тип климата не определен, можно воспользоваться наиболее консервативным правилом определения просвета (см. Примечание 1) для тропического климата или хотя бы правилом, основанном на определении среднего значения просвета в условиях умеренного и тропического климата. Для того чтобы избежать недопустимо больших значений высоты антенн, при выполнении шагов 1 и 3 может оказаться необходимым взять меньшие доли  $F_1$  для частот ниже приблизительно 2 ГГц.

На частотах выше примерно 13 ГГц точность оценки высоты препятствия начинает быть сопоставимой с радиусом зоны Френеля. Эту точность оценки следует добавить к вышеуказанному просвету.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Хотя эти правила консервативны с точки зрения дифракционных потерь, обусловленных субрефракционными замираниями, необходимо понимать, что чрезмерный акцент на сведении к минимуму степени неготовности из-за дифракционных потерь в условиях субрефракции может привести к еще большему ухудшению качества связи и степени готовности в условиях многолучевости. В настоящее время невозможно дать общие критерии для установления компромисса между этими двумя условиями. Подходящими факторами могут стать запасы на замирания в системе.

### 2.2.2.2 Конфигурации из двух или трех антенн с пространственным разнесением

*Шаг 1:* Рассчитать высоту более высокой антенны, используя описанную выше процедуру для одной антенны.

*Шаг 2:* Рассчитать высоту более низкой антенны, требуемую, чтобы обеспечить соответствующее медианное точечное значение коэффициента  $k$  (при отсутствии каких-либо данных используется значение  $k = 4/3$ ) и следующие просветы в зоне Френеля (см. Примечание 1):

от  $0,6 F_1$  до  $0,3 F_1$ , если препятствие на трассе простирается вдоль ее части;

от  $0,3 F_1$  до  $0,0 F_1$ , если на трассе имеется одно или два изолированных препятствия.

В случае необходимости можно взять одно из меньших значений в двух указанных выше диапазонах, для того чтобы избежать недопустимого увеличения высоты антенн или в том случае, когда частота меньше 2 ГГц.

Как вариант, просвет более низкой антенны можно выбрать таким, чтобы дифракционные потери в условиях с нормальной рефракцией (т. е. в полдень; см. п. 8) равнялись приблизительно 6 дБ или другому значению потерь, соответствующему определенному в результате контрольных измерений запасу системы на замирание. Измерения следует проводить в течение нескольких дней, чтобы избежать условий с аномальной рефракцией.

В этом альтернативном случае дифракционные потери также можно оценить с помощью рисунка 1 или уравнения (2).

*Шаг 3:* Удостовериться в том, что пространственное разнесение двух антенн удовлетворяет требованиям к разнесению в условиях многолучевого замирания (см. п. 6.2.1), и, если эти требования не удовлетворяются, произвести соответствующие изменения.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Эти диапазоны величин просвета были выбраны так, чтобы установить диапазон потерь из-за дифракции в пределах от примерно 3 дБ до 6 дБ и чтобы уменьшить вероятность появления замираний, обусловленных поверхностной многолучевостью (см. п. 6.1.3). Очевидно, что профили некоторых трасс не позволят уменьшить просвет до такой степени, и для снижения влияния замираний из-за многолучевости должны быть найдены другие средства.

На трассах, где замирания, обусловленные поверхностной многолучевостью в результате одного или нескольких отражений от ровной поверхности, являются преобладающими (например, над водой или над районами с очень плоской поверхностью), может оказаться желательным сначала рассчитать высоту верхней антенны с использованием процедуры п. 2.2.2.1, а затем рассчитать оптимальное минимальное расстояние для разнесенной антенны в целях защиты от поверхностной многолучевости (см. п. 6.1.3).

В предельных ситуациях (например, очень протяженные надводные трассы) может оказаться необходимым применение конфигурации из трех разнесенных антенн. В этом случае просвет самой низкой антенны может основываться на правиле просветов в шаге 2, а просвет средней антенны – на требовании оптимального разнесения с верхней антенной для снижения влияния поверхностной многолучевости (см. п. 6.2.1).

## 2.3 Замирание и усиление, обусловленные многолучевостью и связанными с ней механизмами

При планировании линий связи протяженностью более нескольких километров следует учитывать три механизма замирания при ясной погоде в условиях существования атмосферных слоев с сильной рефракцией: расширение луча (в англоязычной технической литературе обычно называемое дефокусировкой), развязку антенн, поверхностную и атмосферную многолучевость. Большинство из этих механизмов могут возникать сами по себе или в сочетании друг с другом (см. Примечание 1). Наиболее сильное частотно-избирательное замирание возникает, когда расширение луча прямого сигнала сопровождается его отражением от поверхности, вызывая многолучевое замирание.

Замирание, обусловленное мерцанием, возникающим из-за мелкомасштабных турбулентных неоднородностей, всегда сопровождает названные механизмы, однако на частотах ниже 40 ГГц его вклад в общее замирание незначителен.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Развязка антенн является фактором, определяющим необходимую минимальную ширину луча антенн.

Метод прогнозирования распределения одночастотного (или узкополосного) замирания большой глубины для среднего наихудшего месяца в любой точке земного шара приводится в п. 2.3.1. Этот метод не требует знания профиля трассы и может использоваться для целей предварительного планирования, лицензирования или проектирования. В п. 2.3.2 представлен второй метод, который подходит для замираний любой глубины и основан на использовании метода для глубоких замираний и интерполяционной процедуры для замираний малой глубины.

Метод прогнозирования усиления сигнала изложен в п. 2.3.3. В качестве единственного исходного параметра в этом методе используется глубина замирания, прогнозируемая с помощью метода, описываемого в п. 2.3.1. И наконец, в п. 2.3.4 представлен метод преобразования распределений для среднего наихудшего месяца в среднегодовые распределения.

### 2.3.1 Метод для малых значений процента времени

Многолучевые замирания и усиление, обусловленные многолучевостью необходимо рассчитывать только для трасс длиной свыше 5 км, и они могут быть приравнены к нулю для более коротких трасс.

*Шаг 1:* Для трасс, проходящих над рассматриваемой местностью, оценить геоклиматический коэффициент  $K$  для среднего наихудшего месяца по данным о замираниях для данной географической области, если такие данные имеются (см. Прилагаемый документ 1).

Если и детальное проектирование линии выполняется при отсутствии измеренных данных для  $K$  (см. Примечание 1), следует оценить геоклиматический фактор для среднего наихудшего месяца по формуле:

$$K = 10^{-4,4-0,0027dN_1} (10 + s_a)^{-0,46}, \quad (4)$$

где:

- $dN_1$ : это точечный градиент рефракции в самом нижнем 65-метровом слое атмосферы, не превышаемый в течение 1% среднего года, а  $s_a$  – это неровность местности в рассматриваемой области;
- $dN_1$ : представлен в Рекомендации МСЭ-R P.453-10; истинное значение для широты и долготы в центре трассы должно быть получено из значений для четырех ближайших точек сетки путем билинейной интерполяции;
- $s_a$ : определяется как стандартное отклонение высот местности (м) в пределах зоны 110 км × 110 км с разрешением 30 с (например, данные Globe "gtopo30"). Значение для середины трассы может быть получено с помощью карты неровности поверхности с разрешением 0,5 × 0,5 градусов географических координат с использованием билинейной интерполяции. Данная карта размещена на веб-сайте 3-й Исследовательской комиссии.

Если для применений в целях планирования необходим быстрый расчет  $K$  (см. Примечание 1), то весьма точную оценку можно получить из выражения:

$$K = 10^{-4,6-0,0027dN_1}. \quad (5)$$

*Шаг 2:* Если высота антенн  $h_e$  и  $h_r$  ((м) выше уровня моря) известна, то вычислить абсолютное значение угла наклона трассы  $|\varepsilon_p|$  (мрад) с помощью выражения:

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e| / d, \quad (6)$$

где  $d$  – длина трассы (км).

*Шаг 3:* Для применений в целях детального проектирования линии (см. Примечания 1 и 2), вычислить процент времени  $p_w$  для среднего наихудшего месяца, в течение которого превышает глубина замирания  $A$  (дБ):

$$p_w = Kd^{3,4} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,03} f^{0,8} \times 10^{-0,0007\theta_L - A/10} \quad \% , \quad (7)$$

где:

$f$ : частота (ГГц);

$h_L$ : высота нижней антенны (т. е. меньше по высоте, чем  $h_e$  и  $h_r$ )

и где геоклиматический коэффициент  $K$  получен из уравнения (4).

Для применений в целях быстрого планирования, когда это требуется (см. Примечания 1 и 2), вычислить процент времени  $p_w$  среднего наихудшего месяца, в течение которого превышает глубина замирания  $A$  (дБ):

$$p_w = Kd^{3,1} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,29} f^{0,8} \times 10^{-0,0008\theta_L - A/10} \quad \% , \quad (8)$$

где  $K$  получен из уравнения (5).

**ПРИМЕЧАНИЕ 1.** – Общие стандартные отклонения погрешности в прогнозах с использованием уравнений (4) и (7), а также (5) и (8) составляют 5,7 дБ и 5,9 дБ, соответственно (включая вклад вследствие междугодичной изменчивости). В пределах широкого диапазона длин трасс, включенных в эти цифры, минимальная величина стандартного отклонения погрешности 5,2 дБ применяется для трасс над сушей, для которых  $h_L < 700$  м, а максимальная величина 7,3 дБ – для надводных трасс. Однако небольшая разница между величинами общего стандартного отклонения неточно отражает улучшение качества прогнозов, что наблюдается при использовании уравнений (4) и (7) для линий над очень пересеченной местностью (например, горами) или над очень ровной местностью (например, надводные трассы). Стандартные отклонения погрешности для горных линий связи ( $h_L > 700$  м), например, уменьшаются на 0,6 дБ, а величины отдельных погрешностей для линий над высокогорными районами – на несколько децибелов.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2.** – Уравнения (7) и (8), а также связанные с ними уравнения (4) и (5) для геоклиматического коэффициента  $K$ , были выведены из множественных регрессий по данным замираний для 251 линии в различных геоклиматических районах мира с учетом следующих параметров: длины линий,  $d$ , в диапазоне от 7,5 до 185 км, частоты  $f$  в диапазоне от 450 МГц до 37 ГГц, угла  $|\varepsilon_p|$  наклона трасс до 37 мрад, высоты нижней антенны,  $h_L$ , в диапазоне от 17 до 2300 м, градиенты рефракции,  $dN_1$ , в диапазоне от  $-860$  до  $-150$  N-единиц/км и неровности поверхности в рассматриваемой зоне,  $s_a$ , в диапазоне от 6 до 850 м (для  $s_a < 1$  м следует использовать нижний предел в 1 м).

Предполагается, что уравнения (7) и (8) будут действительны также и для частот по крайней мере до 45 ГГц. Результаты полуэмпирического анализа показывают, что нижняя граница частотного диапазона, для которой это уравнение еще справедливо, обратно пропорциональна длине трассы. Грубую оценку этой нижней частотной границы,  $f_{min}$ , можно получить с помощью соотношения:

$$f_{min} = 15/d \quad \text{ГГц} . \quad (9)$$

### 2.3.2 Метод для всех процентов времени

В представленном ниже методе прогнозирования глубины замираний для процента времени их превышения комбинируются распределение глубоких замираний, описанное в предыдущем разделе, и эмпирическая процедура интерполяции с глубиной замирания до 0 дБ.

*Шаг 1:* Используя метод, описанный в п. 2.3.1, вычислить коэффициент появления многолучевости,  $p_0$  (т. е. пересечение кривой распределения глубоких замираний с осью времени в процентах):

$$p_0 = Kd^{3,4} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,03} f^{0,8} \times 10^{-0,0007\theta_L} \quad \% \quad (10)$$

для применений по детальному проектированию линий связи с  $K$ , полученным из уравнения (4), и

$$p_0 = Kd^{3,1} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,29} f^{0,8} \times 10^{-0,0008\theta_L} \quad \% \quad (11)$$

для применений при быстром планировании с  $K$ , полученным из уравнения (5). Следует отметить, что уравнения (10) и (11) эквивалентны уравнениям (7) и (8), соответственно, при  $A = 0$ .

*Шаг 2:* Вычислить уровень глубины замираний,  $A_t$ , при котором происходит переход от распределения глубоких замираний к распределению неглубоких замираний, в соответствии с прогнозами эмпирической процедуры интерполяции:

$$A_t = 25 + 1,2 \log p_0 \quad \text{дБ} . \quad (12)$$

Далее процедура зависит от того, будет ли уровень  $A$  больше или меньше, чем  $A_t$ .

*Шаг 3a:* Если требуемая глубина замираний,  $A$ , равна или больше, чем  $A_t$ :

Вычислить процент времени, когда  $A$  превышает за средний наихудший месяц:

$$p_w = p_0 \times 10^{-A/10} \quad \% . \quad (13)$$

Следует отметить, что уравнение (13) эквивалентно уравнению (7) или (8), в зависимости от ситуации.

*Шаг 3b:* Если требуемая глубина замираний,  $A$ , меньше, чем  $A_t$ :

Вычислить процент времени,  $p_t$ , когда  $A_t$  превышает за средний наихудший месяц:

$$p_t = p_0 \times 10^{-A_t/10} \quad \% . \quad (14)$$

Следует отметить, что уравнение (14) эквивалентно уравнению (7) или (8), в зависимости от ситуации, при  $A = A_t$ .

Вычислить  $q'_a$  исходя из переходного уровня замирания,  $A_t$ , и соответствующего процента времени,  $p_t$ :

$$q'_a = -20 \log_{10} \left\{ -\ln \left[ \left( 100 - p_t \right) / 100 \right] \right\} / A_t . \quad (15)$$

Вычислить  $q_t$  исходя из  $q'_a$  и переходного уровня замирания,  $A_t$ :

$$q_t = (q'_a - 2) / \left[ \left( 1 + 0,3 \times 10^{-A_t/20} \right) 10^{-0,016A_t} \right] - 4,3 \left( 10^{-A_t/20} + A_t / 800 \right) . \quad (16)$$

Вычислить  $q_a$  исходя из требуемого уровня замирания,  $A$ :

$$q_a = 2 + \left[ 1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right] \left[ 10^{-0,016A} \right] \left[ q_t + 4,3 \left( 10^{-A/20} + A / 800 \right) \right] . \quad (17)$$

Вычислить процент времени,  $p_w$ , в течение которого уровень замирания,  $A$  (дБ), превышает за средний наихудший месяц:

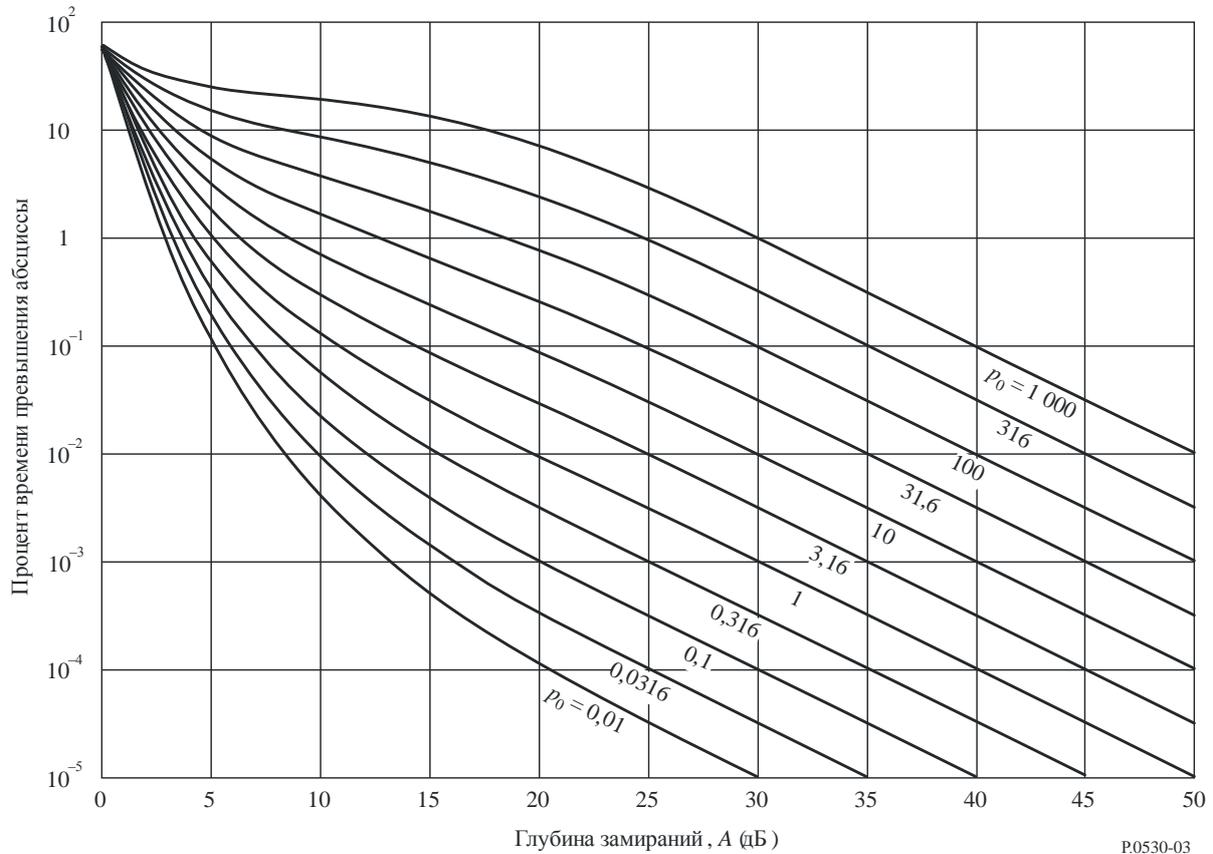
$$p_w = 100 \left[ 1 - \exp \left( -10^{-q_a A/20} \right) \right] \quad \% . \quad (18)$$

При условии, что  $p_0 < 2000$ , следование вышеуказанной процедуре создает монотонное изменение  $p_w$  в зависимости от уровня  $A$ , которое может использоваться для определения уровня  $A$  при заданной величине  $p_w$  с применением простой итерации.

При использовании  $p_0$  в качестве параметра на рисунке 3 показано семейство кривых, обеспечивающих графическое представление данного метода.

РИСУНОК 3

Процент времени,  $p_w$ , в течение которого глубина замирания,  $A$ , превышает за средний наихудший месяц, при  $p_0$  (в уравнении (10) или (11), в зависимости от ситуации), изменяющемся в пределах от 0,01 до 1000



### 2.3.3 Метод прогнозирования усиления

Сильное усиление сигнала наблюдается в условиях возникновения волноводных слоев и связанных с ними замираний, обусловленных многолучевостью. Усиление свыше 10 дБ за средний наихудший месяц следует прогнозировать с помощью следующего соотношения:

$$p_w = 100 - 10^{(-1,7 + 0,2A_{0,01} - E)/3,5} \quad \% \quad \text{для } E > 10 \text{ дБ}, \quad (19)$$

где  $E$  (дБ) – усиление, не превышаемое для  $p\%$  времени, а  $A_{0,01}$  – глубина замирания, прогнозируемая с помощью уравнения (7) или (8), в зависимости от ситуации, и превышаемая в течение  $p_w = 0,01\%$  времени.

Для расчета усиления от 10 до 0 дБ используется следующая пошаговая процедура:

*Шаг 1:* Вычислить процент времени  $p'_w$ , для которого усиление меньше или равно 10 дБ ( $E' = 10$ ), используя уравнение (19).

*Шаг 2:* Вычислить  $q'_e$  с помощью следующего выражения:

$$q'_e = -\frac{20}{E'} \left( \log_{10} \left[ -\ln \left( 1 - \frac{100 - p'_w}{58,21} \right) \right] \right). \quad (20)$$

Шаг 3: Вычислить параметр  $q_s$ :

$$q_s = 2,05q_e' - 20,3. \quad (21)$$

Шаг 4: Вычислить  $q_e$  для требуемого значения  $E$ , используя соотношение:

$$q_e = 8 + \left[ 1 + 0,3 \times 10^{-E/20} \right] \left[ 10^{-0,7E/20} \right] \left[ q_s + 12 \left( 10^{-E/20} + E/800 \right) \right]. \quad (22)$$

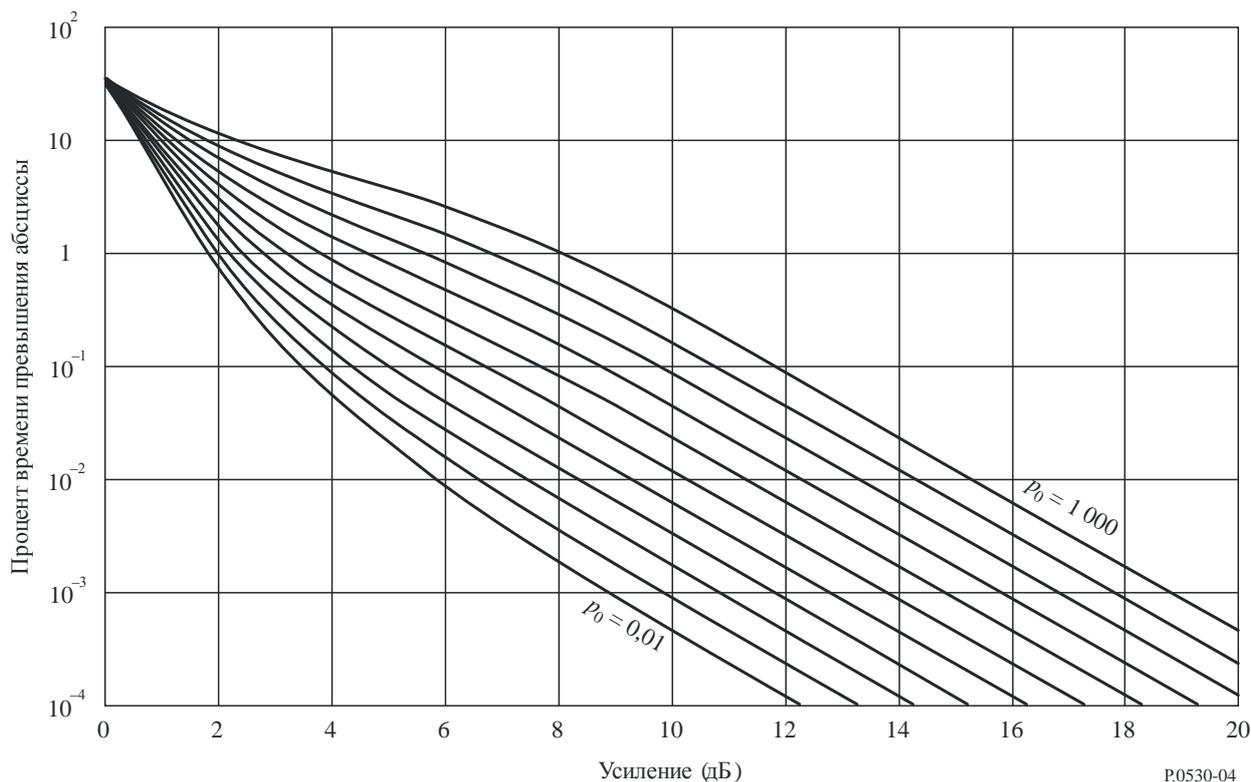
Шаг 5: Процент времени, для которого усиление  $E$  (дБ) не превышает, определяется по формуле:

$$p_w = 100 - 58,21 \left[ 1 - \exp \left( -10^{-q_e E/20} \right) \right]. \quad (23)$$

Семейство кривых на рисунке 4 дает графическое представление метода при использовании  $p_0$  в качестве параметра (см. уравнение (10) или (11), в зависимости от ситуации). Каждая кривая на рисунке 4 соответствует кривой на рисунке 3 при той же величине  $p_0$ . Следует отметить, что на рисунке 4 показан процент времени, в течение которого значения усиления превышаются, что соответствует величине  $(100 - p_w)$ , при  $p_w$ , определяемом уравнениями (19) и (23).

РИСУНОК 4

Процент времени,  $(100 - p_w)$ , в течение которого усиление,  $E$ , превышает за средний наихудший месяц, при  $p_0$  (в уравнении (10) или (11), в зависимости от ситуации), изменяющемся в пределах от 0,01 до 1000



Для прогнозирования процента времени превышения для среднего года, а не среднего наихудшего месяца, см. п. 2.3.4.

### 2.3.4 Преобразование распределений для среднего наихудшего месяца в распределения для среднего года

Распределения замираний и усиления сигнала для среднего наихудшего месяца, полученные с помощью методов, описанных в пп. 2.3.1–2.3.3, можно преобразовать в распределения для среднего года с помощью следующей процедуры:

*Шаг 1:* С помощью уравнения (7) или (8), в зависимости от ситуации, вычислить процент времени  $p_w$ , в течение которого превышает глубина замирания  $A$  для среднего наихудшего месяца в области длинного хвоста распределения.

*Шаг 2:* Вычислить логарифмический геоклиматический коэффициент преобразования,  $\Delta G$ , по формуле:

$$\Delta G = 10,5 - 5,6 \log \left( 1,1 \pm |\cos 2\xi|^{0,7} \right) - 2,7 \log d + 1,7 \log \left( 1 + |\varepsilon_p| \right) \quad \text{дБ}, \quad (24)$$

где  $\Delta G \leq 10,8$  дБ, и знак плюс соответствует значениям  $\xi \leq 45^\circ$ , а знак минус – значениям  $\xi > 45^\circ$ , и где:

$\xi$ : широта (в ° с. ш. или ю. ш.);

$d$ : длина трассы (км);

$|\varepsilon_p|$ : абсолютное значение угла наклона трассы (полученное из уравнения (6)).

*Шаг 3:* Вычислить процент времени,  $p$ , превышения глубины замирания,  $A$ , в области глубоких замираний (длинный хвост распределения) для усредненного года по формуле:

$$p = 10^{-\Delta G / 10} p_w \quad \%. \quad (25)$$

*Шаг 4:* Если требуется распределение в области неглубоких замираний, используется метод, описанный в шаге 3б п. 2.3.2, со следующими изменениями:

- 1) преобразовать величину  $p_t$ , полученную в уравнении (14), в годовую величину посредством уравнения (25) и использовать эту годовую величину вместо  $p_t$ , в то время как  $p_t$  включается в уравнение (15);
- 2) величина  $p_w$ , рассчитываемая с помощью уравнения (18), представляет собой требуемую годовую величину  $p$ .

*Шаг 5:* Если требуется составить прогноз распределения усиления для среднего года, используется метод из п. 2.3.3, где в этом случае  $A_{0,01}$  будет глубиной замирания, превышаемой в течение 0,01% времени среднего года. Прежде всего следует определить значение  $p_w$ , инвертировав уравнение (25) и положив  $p = 0,01\%$ . Затем рассчитать глубину замирания  $A_{0,01}$ , превышаемую для 0,01% времени среднего года, инвертировав уравнение (7) или (8), в зависимости от ситуации, и заменив  $p_w$  на  $p$ .

### 2.3.5 Преобразование от среднего наихудшего месяца к более коротким наихудшим периодам времени

Процент времени,  $p_w$ , превышения уровня глубоких замираний,  $A$ , за средний наихудший месяц может быть преобразован в процент времени,  $p_{sw}$ , превышения такого же уровня глубоких замираний,  $A$ , за более короткий наихудший период времени,  $T$ , с помощью соотношений:

$$p_{sw} = p_w \cdot (89,34T^{-0,854} + 0,676) \quad \% \quad 1 \text{ ч} \leq T < 720 \text{ ч для сравнительно плоских трасс}, \quad (26)$$

$$p_{sw} = p_w \cdot (119T^{-0,78} + 0,295) \quad \% \quad 1 \text{ ч} \leq T < 720 \text{ ч для холмистых трасс}, \quad (27)$$

$$p_{sw} = p_w \cdot (199,85T^{-0,834} + 0,175) \quad \% \quad 1 \text{ ч} \leq T < 720 \text{ ч для холмистых сухопутных трасс}. \quad (28)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Уравнения (26)–(28) были получены на основе данных для 25 линий связи в регионах с умеренным климатом, для которых величина  $p_w$  определяется из данных для летних месяцев.

### 2.3.6 Прогнозирование неселективных сбоев (см. Примечание 1)

При проектировании цифровых линий рассчитать вероятность сбоя  $P_{ns}$  из-за неселективной составляющей замирания (см. п. 7) по формуле:

$$P_{ns} = p_w / 100 , \quad (29)$$

где  $p_w$  (%) – процент времени, в течение которого для наихудшего среднего месяца превышает запас на амплитудное замирание  $A = F$  (дБ), соответствующий заданному коэффициенту ошибок по битам (BER) (определяется в соответствии с п. 2.3.1 или п. 2.3.2, в зависимости от ситуации). Запас на амплитудное замирание,  $F$ , определяется при расчете линии с учетом технических характеристик конкретного оборудования, а также возможного ослабления сигнала за счет помех на действующей линии.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для удобства сбой здесь определяется как вероятность того, что BER превышает заданное пороговое значение, каким бы оно ни было (подробно см. п. 7).

### 2.3.7 Возникновение одновременных замираний на многопролетных линиях

Экспериментальные исследования показывают, что в условиях ясного неба глубокие замирания на соседних пролетах многопролетных линий являются практически некоррелированными событиями. Это относится к случаям возникновения частотно-избирательных замираний, амплитудных замираний или их сочетания.

Для многопролетных линий верхняя граница общей вероятности сбоев для условий ясного неба может быть получена путем суммирования вероятностей сбоев на отдельных пролетах. Более точно верхнюю границу для вероятности превышения глубины замирания  $A$  (дБ) на линии из  $n$  пролетов можно оценить как (см. Примечание 1):

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^{n-1} (P_i P_{i+1})^C , \quad (30a)$$

$$C = 0,5 + 0,0052A + 0,0025(d_A + d_B), \quad (30b)$$

где  $P_i$  – это вероятность сбоев, прогнозируемая для  $i$ -го пролета из общего числа  $n$  пролетов, а  $d_i$  – длина трассы (км)  $i$ -го пролета. Уравнение (30b) следует использовать при значениях  $A \leq 40$  дБ и  $(d_i + d_{i+1}) \leq 120$  км. При значениях, превышающих эти пределы,  $C = 1$ .

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Уравнение (30b) получено на основе измерений, проведенных на 19 парах смежных пролетов, работающих в пределах прямой видимости на полосах частот в 4 и 6 ГГц, при длине трасс от 33 до 64 км.

### 2.3.8 Статистические данные о числе событий ослабления, длящихся 10 с или больше, вследствие многолучевого распространения

Исходя из экспериментальных исследований, проведенных Россией, Бразилией и Японией в полосе частот 3,7–29,3 ГГц и на трассах длиной от 12,5 до 166 км, среднее число  $N_{10s}$  в зависимости от вероятности  $p(A)$  превышения ослабления вследствие многолучевого распространения в течение годового периода рассчитывается следующим образом:

$$N_{10s} = 3650 \cdot p(A)^{0,95}, \quad (31)$$

где  $p(A)$  выражается в процентах.

## 2.4 Затухание, вызванное гидрометеорами

Затухание радиоволн может быть также результатом поглощения и рассеяния за счет таких гидрометеоров, как дождь, снег, град и туман. Хотя на частотах ниже приблизительно 5 ГГц затуханием в дожде можно пренебречь, на более высоких частотах такое затухание должно учитываться в проектных расчетах, поскольку его значимость быстро возрастает. Метод получения долгосрочной статистики затухания в дожде описывается в п. 2.4.1. На трассах, пролегающих в области высоких широт, или на высоких трассах в области более низких широт, мокрый снег может вызвать значительное затухание даже в более широком диапазоне частот. Более подробная информация о затухании, вызванном гидрометеорами, отличными от дождя, приводится в Рекомендации МСЭ-R P.840.

На частотах, где необходимо учитывать и затухание в дожде и замирание вследствие многолучевости, проценты времени превышения данной глубины замирания, соответствующие каждому из этих явлений, могут складываться.

### 2.4.1 Долгосрочная статистика затухания в дожде

Для оценки долгосрочной статистики затухания в дожде можно воспользоваться следующей простой процедурой:

*Шаг 1:* Получить значение интенсивности дождя  $R_{0,01}$ , превышаемой в течение 0,01% времени (при времени интегрирования 1 мин.). Если местные источники, содержащие результаты долгосрочных измерений, такой информацией не располагают, то оценку этой величины можно получить на основе данных, представленных в Рекомендации МСЭ-R P.837.

*Шаг 2:* Вычислить удельное затухание,  $\gamma_R$  (дБ/км), для заданных частоты, поляризации и интенсивности дождя, пользуясь Рекомендацией МСЭ-R P.838.

*Шаг 3:* Вычислить эффективную длину трассы радиолинии,  $d_{eff}$ , путем умножения фактической длины трассы  $d$  на коэффициент дальности  $r$ . Оценка этого коэффициента можно получить из уравнения:

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633}R_{0,01}^{0,073\alpha}f^{0,123} - 10,579(1 - \exp(-0,024d))}, \quad (32)$$

где  $f$  (ГГц) – частота, а  $\alpha$  – экспонента в конкретной модели затухания в шаге 2. Максимальное рекомендуемое значение  $r$  составляет 2,5, таким образом, если знаменатель уравнения (32) меньше 0,4, то используется  $r = 2,5$ .

*Шаг 4:* Оценка затухания на трассе, превышаемого в течение 0,01% времени, можно получить из уравнения:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R d r \quad \text{дБ.} \quad (33)$$

*Шаг 5:* Затухание, превышаемое в течение других процентов времени,  $p$ , в диапазоне от 0,001% до 1%, можно получить с помощью следующего степенного выражения:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)}. \quad (34)$$

при:  $C_1 = (0,07^{C_0}) [0,12^{(1-C_0)}]$  (35a)

$$C_2 = 0,855C_0 + 0,54(1 - C_0) \quad (35b)$$

$$C_3 = 0,139C_0 + 0,043(1 - C_0), \quad (35c)$$

где:

$$C_0 = \begin{cases} 0,12 + 0,4 \left[ \log_{10}(f/10)^{0,8} \right] & f \geq 10 \text{ ГГц} \\ 0,12 & f < 10 \text{ ГГц} \end{cases} \quad (36)$$

*Шаг б:* Если интерес представляет статистика затухания за наихудший месяц, то следует вычислить среднегодовой процент времени превышения,  $p$ , соответствующий проценту времени,  $p_w$ , для наихудшего месяца, используя климатологические данные, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.841. Значения  $A$ , превышенные для процентов времени  $p$  за год, будут превышены в течение соответствующих процентов времени,  $p_w$ , наихудшего месяца.

Считается, что описанная выше процедура прогнозирования может использоваться для любых точек земного шара на частотах по крайней мере до 40 ГГц и для трасс протяженностью до 60 км.

#### 2.4.2 Комбинированный метод для дождя и мокрого снега

Затухание в дожде,  $A_p$ , превышаемое в течение времени в процентах  $p$ , полученного из уравнения (34) в п. 2.4.1, выше, имеет силу для трасс радиосвязи, через которые проходят только дождевые жидкие осадки.

Возможно, что на замирание на наземной трассе воздействуют тающие льдинки или мокрый снег в слое таяния. Масштабы такого воздействия определяются высотой линии радиосвязи по отношению к высоте слоя дождя, которая зависит от времени и географического расположения.

Образование льда на антенне или же на кожухе или окне антенны может вызвать значительное дополнительное затухание. Составление глобальной модели этого не представляется практически возможным, так как для надежной работы в условиях замораживания следует не допускать образования льда на антенне. Приведенный ниже метод оценки комбинированного затухания в условиях дождя и мокрого снега применяется к антеннам, не покрытым льдом.

С помощью следующего метода оценивается затухание, превышаемое в течение времени в процентах с учетом дождя и мокрого снега. Это метод следует использовать вместо метода, приведенного в п. 2.4.1, если только заранее не известно, что трасса не затронута мокрым снегом. Приведенный в нижеследующих пунктах метод начинается с определения необходимости учитывать мокрый снег. Если такой необходимости не существует, методом по умолчанию является процедура, приведенная в п. 2.4.1.

В комбинированной модели дождя/мокрого снега принято, что отсутствует корреляция между интенсивностью дождя и средней высотой слоя таяния. Если статистически достоверные местные данные указывают на наличие такой корреляции, то предпочтительно использовать модель с этими данными на сезонной или месячной основе, в зависимости от периодов времени, в течение которых можно принять корреляцию пренебрежимо малой.

##### 2.4.2.1 Предварительные испытания

Рассчитать нижнее и верхнее значения высоты антенны по следующим формулам:

$$h_{lo} = \min(h_1, h_2) \quad (\text{метров над уровнем моря}) \quad (37a)$$

$$h_{hi} = \max(h_1, h_2) \quad (\text{метров над уровнем моря}), \quad (37b)$$

где  $h_{1,2}$  – значения высоты окончных устройств линии в метрах над уровнем моря.

Получить медианную высоту слоя дождя,  $h_{rainm}$ , в метрах над средним уровнем моря. Если такая долгосрочная статистика не может быть получена из местных источников данных, может быть получена оценка на основе Рекомендации МСЭ-R P.839.

Проверить существование двух случаев, ни один из которых не требует продолжения применения метода для дождя/мокрого снега:

*Случай 1:* если  $h_{hi} \leq h_{rainm} - 3600$ , слой таяния всегда целиком находится выше трассы. В этом случае использовать метод, приведенный в п. 2.4.1, для ослабления только в дожде.

*Случай 2:* если  $h_{lo} \geq h_{rainm} + 2400$ , слой таяния всегда целиком находится ниже трассы. В этом случае затухание вследствие осадков может быть принято равным нулю.

Если не применим ни первый, ни второй случай, следовать описанной далее процедуре.

#### 2.4.2.2 Предварительные расчеты

Каждый из двух приведенных ниже предварительных расчетов выполняется только один раз.

i) *Затухание только в дожде, превышаемое в течение требуемого процента время*

Использовать метода п. 2.4.1 для получения затухания только в дожде  $A_{rainp}$  дБ, превышаемого в течение требуемого процента времени,  $p$ , по уравнению (34).

ii) *Векторы затухания только в дожде и соответствующий процент времени*

Комбинированная модель для дождя/мокрого снега требует нескольких значений процента времени, в течение которого превышаются заданные значения затухания только в дожде. Таким образом, если модель затухания в дожде – это функция  $A(p)$ , то модель для дождя/мокрого снега требует дополнительной функции  $p(A)$ . В качестве эффективного средства получения этой функции для любой модели затухания в дожде оцениваются два вектора (одномерные массивы):

вектор  $T$ , содержащий значения процента времени, который логарифмически уменьшается в 10 значениях на декаду;

вектор  $A$ , содержащий соответствующие значения затухания только в дожде, превышаемые в течение каждого процента времени.

В этом описании модели для дождя/мокрого снега отдельные члены векторов обозначаются подстрочными индексами, заключенными в квадратные скобки. Для векторов  $T$  и  $A$  наименьшим индексом является нуль.

Установить первое значение каждого вектора следующим образом:

$$T_{[0]} = P_0 \quad (\% \text{ времени}) \quad (38)$$

$$A_{[0]} = 0 \quad (\text{дБ}), \quad (39)$$

где  $P_0$  – процентная вероятность дождевых осадков в среднем году, приведенная в уравнении (1) Рекомендации МСЭ-R P.837-6, которая была рассчитана в п. i) предварительных расчетов, выше.

Для индексов  $t = 1, 2, 3 \dots$  и. т. д. установить последовательные пары значений следующим образом:

$$T_{[t]} = P_0 10^{-0,1t} \quad (\% \text{ времени}) \quad (40)$$

$$A_{[t]} = A(T_{[t]}) \quad (\text{дБ}), \quad (41)$$

где  $A(T_{[t]})$  – затухание только в дожде, превышаемое в течение процента времени  $T_{[t]}$ , определенного по уравнению (33).

Продолжать рассчитывать по уравнениям (40) и (41) последовательные пары значений индекса  $t$ , до тех пор пока либо  $T_{[t]} \geq 0,001 \%$  или  $A_{[t]} - A_{[t-1]} \geq 0,1$  дБ. Прекратить процесс, когда не выполняется ни одно из этих условий.

Сделать следующие назначения, которые будут использоваться в расчетах позже:

$$N_{last} = N_t - 1 \quad (42)$$

$$A_{last} = A_{[N_{last}]} \quad (\text{дБ}) \quad (42a)$$

$$T_{last} = T_{[N_{last}]} \quad (\% \text{ времени}), \quad (42b)$$

где  $N_t$  – число членов в каждом  $A$  и  $T$ .

Исключительно в целях эффективности расчетов: при повторном прогоне модели для дождя для уравнения (41) в Рекомендации МСЭ-R P.837-6 каждый раз следует применять только уравнения (2b), (2c) и, следовательно, (2), так как все остальные значения остаются постоянными для широты и долготы радиотрассы. Кроме того, в уравнении (33), приведенном в п. 2.4.1, выше, постоянными остаются значения  $k$  и  $\alpha$ .

### 2.4.2.3 Изменение высоты слоя дождя

Следует использовать, если имеется, долгосрочную статистику изменчивости измеренных значений высоты слоя дождя. Если такие данные отсутствуют, изменение высоты слоя дождя моделируется с помощью 49 значений высоты относительно средней высоты слоя дождя с соответствующей каждому из них вероятностью, которая приведена в Таблице 1, что дает значения вероятности  $P_n$  того, что высота слоя дождя будет находиться в пределах 49 диапазонов 100 метров относительно средней высоты слоя дождя. Предполагается нормальное распределение и, таким образом, все, кроме центрального значения вероятности, могут быть определены с помощью одного из двух индексов, которые перечислены в левом столбце таблицы.

ТАБЛИЦА 1

Индекс "n"		Вероятность $P_n$
Либо	Либо	
0	48	0,000555
1	47	0,000802
2	46	0,001139
3	45	0,001594
4	44	0,002196
5	43	0,002978
6	42	0,003976
7	41	0,005227
8	40	0,006764
9	39	0,008617
10	38	0,010808
11	37	0,013346
12	36	0,016225
13	35	0,019419
14	34	0,022881
15	33	0,026542
16	32	0,030312
17	31	0,034081
18	30	0,037724
19	29	0,041110
20	28	0,044104
21	27	0,046583
22	26	0,048439
23	25	0,049588
24		0,049977

### 2.4.2.4 Определение функций, используемых в следующем методе

В приведенном в п. 2.4.2.3, ниже, пошаговом методе используются три следующие функции.

#### Функция 1: Множитель затухания

Изменение конкретного затухания, как множитель затухания в дБ, определяется как функция высоты относительно высоты слоя дождя в метрах:

$$\Gamma(\Delta h) = \begin{cases} 0 & 0 < \Delta h \\ \frac{4(1 - e^{\Delta h/70})^2}{\left(1 + (1 - e^{-(\Delta h/600)^2})^2 (4(1 - e^{\Delta h/70})^2 - 1)\right)} & -1200 \leq \Delta h \leq 0 \\ 1 & \Delta h < -1200 \end{cases}, \quad (43)$$

где  $\Delta h = h - h_{rainm}$  и  $h$  – это рассматриваемая высота.

Эта функция используется повторно для различных значений  $\Delta h$ . Влияние тающих льдинок моделируется как значимое начиная с высоты слоя дождя и до 1200 метров ниже этой высоты. Затухание вследствие любого сухого льда выше высоты слоя дождя принимается несущественным. На уровне на 1200 м ниже высоты слоя дождя множитель принимает значение 1, указывая на нормальное затухание только из-за дождя.

### Функция 2: Усредненный по трассе множитель

Усредненный по трассе множитель затухания  $g(h_{rain})$  определяется как функция высоты слоя дождя,  $h_{rain}$ , в метрах над уровнем моря для данной радиотрассы. Эта функция используется для разных значение высоты слоя дождя, для того чтобы учесть изменчивость высоты слоя дождя относительно среднего значения  $h_{rainm}$ .

Эта функция делит высоту слоя таяния 1200 метров на 12 интервалов по 100 м каждый, с индексами от 1 для самого верхнего до 12 для самого нижнего. Таким образом, эти интервалы пронумерованы в нисходящем направлении начиная с высоты слоя дождя. Для целей расчетов разрешается применять отрицательные индексы выше высоты слоя дождя и значения, превышающие 12, ниже уровня таяния.

Рассчитать индексы самого нижнего и самого верхнего интервалов, занятых любой частью трассы:

$$s_{lo} = 1 + floor\left(\frac{h_{rain} - h_{lo}}{100}\right) \quad (44a)$$

$$s_{hi} = 1 + floor\left(\frac{h_{rain} - h_{hi}}{100}\right), \quad (44b)$$

где функция "floor" возвращает наибольшее целое число, не превышающее своего аргумента, а  $h_{lo}$  и  $h_{hi}$  рассчитываются в п. 2.4.2.1, выше.

Не следует рассматривать следующие случаи:

Если  $s_{lo} < 1$ , то трасса целиком находится выше слоя таяния. В этом случае  $g = 0$ , и на данном этапе дальнейшие вычисления не требуются.

Если  $s_{hi} > 12$ , то трасса целиком находится ниже слоя таяния. В этом случае  $g = 1$ , и на данном этапе дальнейшие вычисления не требуются.

Если  $s_{lo} = s_{hi}$ , то трасса целиком находится в одном интервале слоя таяния. В этом случае:

$$g = \Gamma(\delta h), \quad (45)$$

$$\text{где} \quad \delta h = 0,5 (h_{lo} + h_{hi}) - h_{rain} \quad (45a)$$

и дальнейшие вычисления не требуются.

Если расчеты достигли данной точки, то трасса должна проходить через несколько интервалов слоя таяния. Участки трассы могут также существовать ниже и выше этого слоя.

Рассчитать индексы первого и последнего интервалов, которые должны учитываться в нижеследующей петле:

$$s_{first} = \max(s_{hi}, 1) \quad (46a)$$

$$s_{last} = \min(s_{lo}, 12) \quad (46b)$$

Установить в нуль исходное значение множителя  $g$ , который должен использоваться в качестве сумматора.

Для каждого индекса  $s$  интервалов от  $s_{first}$  до  $s_{last}$  включительно:

*Начало расчета для каждого индекса интервала*

Только одно из следующих трех условий должно быть истинным. Для истинного условия рассчитать среднюю высоту трассы в пределах интервала относительно высоты слоя дождя,  $\Delta h$ , и участок трассы в пределах интервала,  $q$ .

Если  $s_{hi} < s$  и  $s < s_{lo}$ , трасса полностью пересекает интервал:

$$\Delta h = 100(0,5 - s) \quad (\text{м}) \quad (47a)$$

$$q = \frac{100}{h_{hi} - h_{lo}} \quad (47b)$$

Если  $s = s_{lo}$ , нижняя из антенн находится в пределах интервала:

$$\Delta h = 0, [h_{lo} - h_{rain} - 100(s - 1)] \quad (\text{м}) \quad (48a)$$

$$q = \frac{h_{rain} - 100(s - 1) - h_{lo}}{h_{hi} - h_{lo}} \quad (48b)$$

Если  $s = s_{hi}$ , верхняя из антенн находится в пределах интервала:

$$\Delta h = 0,5[h_{hi} - h_{rain} - 100c] \quad (\text{м}) \quad (49a)$$

$$q = \frac{h_{hi} - h_{rain} + 100c}{h_{hi} - h_{lo}} \quad (49b)$$

После расчета  $\Delta h$  и  $q$  для одного из предыдущих случаев:

Использовать функцию 1, определенную выше, для расчета множителя затухания для данного интервала:

$$g_{slice} = \Gamma(\Delta h) \quad (50)$$

Суммировать множитель, взвешенный по участку трассы в пределах интервала:

$$g = g + q g_{slice} \quad (51)$$

*Конец расчета для каждого индекса интервала*

Если  $s_{lo} > 12$ , часть трассы находится ниже слоя таяния. Только в этом случае рассчитать участок трассы, который находится ниже слоя:

$$q = \frac{h_{rain} - 1200 - h_{lo}}{h_{hi} - h_{lo}} \quad (52)$$

И так как множитель затухания в данном случае составляет 1, суммировать только участок трассы:

$$g = g + q \quad (53)$$

Усредненный по трассе множитель затухания,  $g$ , для текущей высоты слоя дождя рассчитан.

### **Функция 3: Процент времени как функция затухания только в дожде**

Функция  $T(A)$  возвращает процент времени, в течение которого превышает данное затухание только в дожде,  $A$  (дБ), в соответствии с уравнением (33). Хорошее приближение к данной функции достигается при использовании векторов  $T$  и  $A$ , которые определены в п. 2.4.2.2 ii).

При том что модель затухания в дожде, приведенная в п. 2.4.1, недействительна для процентов времени менее 0,001%, модель для дождя и мокрого снега может потребовать более низких значений процента времени. Для этой цели модель затухания в дожде расширяется для включения значений затухания больше  $A_{last}$  при постоянном наклоне 1 дБ/декада процента времени. Испытания показывают, что такое расширение оказывает лишь небольшое воздействие на окончательный результат, не чувствительный к выбору наклона.

Использовать один из следующих далее случаев.

Случай 1:  $A > A_{last}$

В этом случае  $p$  задается расширением нижнего значения времени, используя:

$$p = 10^{A_{last} - A + \log(T_{last})}, \quad (54)$$

где  $A_{last}$  и  $T_{last}$  задаются уравнениями (42a) и (42b), соответственно.

Случай 2:  $A \leq A_{last}$

В этом случае  $p$  рассчитывается по векторам  $A$  и  $T$  следующим образом.

Установить низшие и высшие индексы для  $A$  и  $T$  в начальные значения, ограничивающие векторы целиком:

$$k_{inf} = 0 \quad (55a)$$

$$k_{sup} = N_{last} \quad (55b)$$

С помощью следующего итерационного расчета определяются значения  $k_{inf}$  и  $k_{sup}$ , которые определяют границы  $A$ .

При  $k_{sup} - k_{inf} > 1$ :

*начало цикла с проверкой условия*

$$k_{try} = \text{floor}\left(\frac{k_{inf} + k_{sup}}{2}\right) \quad (56)$$

$$\text{если } A_{k_{try}} < A \quad k_{inf} = k_{try} \quad (56a)$$

$$\text{иначе} \quad k_{sup} = k_{try} \quad (56b)$$

*конец цикла с проверкой условия,*

где функция "floor" возвращает наибольшее целое число, равное или меньшее своего аргумента.

Требуемый процент времени теперь хорошо аппроксимируется с помощью логарифмической интерполяции:

$$p = 10^u \quad (57)$$

$$\text{где} \quad u = \log\left(T_{[k_{sup}]}\right) + \log\left(\frac{T_{[k_{inf}]}}{T_{[k_{sup}]}}\right) \frac{A_{[k_{sup}]} - A}{A_{[k_{sup}]} - A_{[k_{inf}]}} \quad (57a)$$

Функция  $T(A)$  возвращает значение  $p$ , рассчитанное по уравнению (54) или (57).

#### 2.4.2.5 Пошаговое описание метода для дождя/мокрого снега

##### Шаг 1: Векторы множителей и вероятностей

Использовать следующий метод для расчета двух векторов –  $G$ , который содержит множители усредненного по трассе затухания, и  $P$ , который содержит соответствующие значения вероятностей.

Для векторов  $G$  и  $P$ , для каждого, требуется самое большое по 49 членов. В нижеследующем описании принято, что в каждом векторе имеется это число ячеек. Фактическое используемое число рассчитывается как целое число  $M$ .

Как и для векторов  $T$  и  $A$ , отдельные члены векторов  $G$  и  $P$  обозначаются подстрочными индексами, заключенными в квадратные скобки, начиная с нуля.

Установить исходное значение всех членов  $G$  и  $P$  равным нулю.

Установить исходное значение  $G_{[0]}$  равным 1.

Установить исходное значение индексов  $n$  и  $m$ , каждого, равным нулю.

Далее начинается цикл вычислений, который состоит в приращении значений  $n$  от  $n = 0$  до  $n = 48$ .

Начало цикла вычислений для каждого значения индекса  $n$

Шаг а): рассчитать высоту слоя дождя:

$$h_{rain} = h_{rainm} - 2400 + 100n \quad (\text{метров над уровнем моря}) \quad (58)$$

Шаг б): если  $h_{lo} \geq h_{rain}$ , уровень таяния полностью находится ниже трассы для данной высоты слоя дождя. В этом случае не требуется ввода в векторах  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{P}$ . Если  $n < 48$ , повторяется приращение  $n$  и опять выполняется шаг а), иначе, остановить данный цикл и продолжать начиная с уравнения (63).

Если  $h_{lo} < h_{rain}$ , переходить к шагу с).

Шаг с): если  $h_{hi} > (h_{rain} - 1200)$  по крайней мере некоторая часть трассы находится в слое таяния. В этом случае выполнить следующие действия.

Использовать функцию 2, определенную в п. 2.4.2.4, с текущим значением  $h_{rain}$  в качестве аргумента для расчета усредненного по трассе множителя затухания  $g$  для данной высоты слоя дождя и назначить это значение вектору  $\mathbf{G}$  для текущего значения индекса  $m$ :

$$\mathbf{G}_{[m]} = g(h_{rain}) \quad (59)$$

Назначить вероятность этой высоты слоя дождя вектору  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P}_{[m]} = \mathbf{\Pi}_{[n]} \quad (60)$$

где  $\mathbf{\Pi}_{[n]}$  берется из таблицы 1.

Если  $n < 48$ , выполнить приращение индекса  $m$ .

Если  $n < 48$ , выполнить приращение индекса  $n$  и начать с шага а), иначе прекратить этот цикл и продолжать начиная с уравнения (63).

Если  $h_{hi} \leq (h_{rain} - 1200)$ , перейти к шагу d).

Шаг d): на этом шаге определяются значения  $n$ , для которых слой таяния полностью находится выше трассы. Назначить множитель, равный 1, вектору  $\mathbf{G}$ :

$$\mathbf{G}_{[m]} = 1 \quad (61)$$

Суммировать вероятность этой высоты слоя в вектор  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P}_{[m]} = \mathbf{P}_{[m]} + \mathbf{\Pi}_{[n]} \quad (62)$$

где  $\mathbf{\Pi}_{[n]}$  берется из таблицы 1.

Следует обратить внимание, что на этом шаге приращение индекса  $m$  не выполняется.

Если  $n < 48$ , выполнить приращение индекса  $n$  и начать с шага а), иначе прекратить этот цикл и продолжать начиная с уравнения (63).

Конец цикла вычислений для каждого значения индекса  $n$

Рассчитать число членов в каждом векторе  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{P}$ :

$$M = m + 1 \quad (63)$$

## Шаг 2: Начальная итерация

Установить начальное пробное значение затухания:

$$A_{trial} = A_{rainp} \quad (\text{дБ}) \quad (64)$$

где  $A_{rainp}$ , рассчитано согласно п. 2.4.2.2 i).

Рассчитать соответствующее значение процента времени, в течение которого превышает это пробное затухание:

$$p_{trial} = \sum_{m=0}^{M-1} \mathbf{P}_{[m]} T \left( \frac{A_{trial}}{\mathbf{G}_{[m]}} \right) \quad (\%) \quad (65)$$

где  $T$  – функция 3, определенная в п. 2.4.2.4, выше.

Подготовиться к бинарному поиску, для чего рассчитать минимальное и максимальное затухание для одного из следующих ниже случаев.

*Случай 1:  $p_{trial} > p$ :*

В этом случае пробное затухание увеличивается с приращением  $A_p$  до  $p_{trial} \leq p$  следующим образом:

При  $p_{trial} > p$ :

*начало цикла с проверкой условия:*

выполнить приращение пробного затухания и рассчитать соответствующее значение  $p_{trial}$ :

$$A_{trial} = A_{trial} + A_{rainp} \quad (\text{дБ}) \quad (66a)$$

$$p_{trial} = \sum_{m=0}^{M-1} P_{[m]} T \left( \frac{A_{trial}}{G_{[m]}} \right) \quad (\%) \quad (66b)$$

*конец цикла с проверкой условия:*

$$A_{min} = A_{trial} - A_{rainp} \quad (\text{дБ}) \quad (67a)$$

$$A_{max} = A_{trial} \quad (\text{дБ}) \quad (67b)$$

*Случай 2:  $p_{trial} \leq p$ :*

в этом случае  $A_{min}$  и  $A_{max}$  устанавливаются непосредственно, используя:

$$A_{min} = 0,01 \quad (\text{дБ}) \quad (68a)$$

$$A_{max} = A_{trial} \quad (\text{дБ}) \quad (68b)$$

Вернуть пробное затухание в центр диапазона поиска в дБ:

$$A_{trial} = 0,5(A_{min} + A_{max}) \quad (\text{дБ}) \quad (69)$$

### Шаг 3: Бинарный поиск

Установить целевой диапазон поиска для затухания:

$$A_{range} = \min(0,1; 0,01A_{rainp}) \quad (\text{дБ}) \quad (70)$$

где  $A_{rainp}$ , рассчитано согласно п. 2.4.2.2 i).

При  $(A_{max} - A_{min}) > A_{range}$

*Начало цикла с проверкой условия*

Пересчитать  $p_{trial}$ , используя уравнение (65) с текущим значением  $A_{trial}$ .

Установить диапазон поиска в исходное состояние согласно одному из следующих случаев:

если  $p_{trial} > p$ ,

$$A_{min} = A_{trial} \quad (\text{дБ}) \quad (71a)$$

если  $p_{trial} \leq p$ ,

$$A_{max} = A_{trial} \quad (\text{дБ}) \quad (71b)$$

Пересчитать  $A_{trial}$ , используя уравнение (69) с текущими значениями  $A_{min}$  и  $A_{max}$ .

*Конец цикла с проверкой условия*

Затухание в результате комбинированного воздействия дождя и мокрого снега, превышаемое в течение  $p\%$  времени, определено теперь значением  $A_{trial}$  (дБ).

### 2.4.3 Пересчет по частоте долгосрочной статистики затухания в дожде

Если имеется надежная долгосрочная статистика затухания на какой-либо одной частоте, то с помощью приводимого ниже эмпирического соотношения ее можно использовать для получения грубой оценки статистики затухания на других частотах в диапазоне от 7 до 50 ГГц при той же длине скачка и аналогичных климатических условиях:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^{1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)}, \quad (72)$$

где:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2}. \quad (73)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55}. \quad (74)$$

Здесь  $A_1$  и  $A_2$  – равновероятные значения превышения затухания в дожде на частотах  $f_1$  и  $f_2$  (ГГц), соответственно.

### 2.4.4 Пересчет по поляризации долгосрочной статистики затухания в дожде

Если для данной радиолинии существует долгосрочная статистика затухания для поляризации одного типа (вертикальной (V) или горизонтальной (H)), то затухание для поляризации другого типа на той же самой линии можно получить с помощью следующих простых формул:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{дБ} \quad (75)$$

или

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{дБ}. \quad (76)$$

Считается, что эти выражения остаются справедливыми в диапазонах длин трасс и частот, указанных для метода прогнозирования в п. 2.4.1.

### 2.4.5 Статистические данные о длительности события и числе событий

Хотя на настоящий момент существует мало сведений об общем распределении длительности замираний, имеются некоторые данные и эмпирическая модель для конкретной статистической информации, такой как средняя длительность события замирания и число таких событий. Тем не менее наблюдаемая разность между средним и медианным значениями длительности замираний указывает на асимметричность общего распределения длительности. Кроме того, существует веское доказательство того, что длительность событий замирания в условиях дождя намного превышает такую длительность в условиях многолучевости.

Событие затухания определяется здесь как превышение уровня затухания  $A$  в течение заданного периода времени (например, 10 с или более). Соотношение между числом событий затухания,  $N(A)$ , средней длительностью  $D_m(A)$  таких событий и общим временем  $T(A)$ , в течение которого уровень затухания  $A$  превышает заданную длительность, определяется как:

$$N(A) = T(A) / D_m(A). \quad (77)$$

Общее время  $T(A)$  зависит от определения события. Данное событие, обычно представляющее интерес для использования в статистике, – это событие затухания  $A$ , продолжающееся 10 с или более. Тем не менее события меньшей длительности (например, используемый в эксперименте интервал выборки в 1 с) также представляют интерес для определения процента общего времени простоя, обусловленного неготовностью (т. е. общее время событий, продолжающихся 10 с или более).

Число событий замираний, превышающих уровень затухания  $A$  в течение 10 с или более, может быть представлено как (см. Примечание 1):

$$N_{10s}(A) = 1 + 1313 \cdot [p(A)]^{0,945}, \quad (78)$$

где  $p(A)$  – процент времени среднего года, в течение которого превышает величина затухания в дожде  $A$  (дБ). Если местные источники, содержащие результаты долгосрочных измерений, такой информацией не располагают, она может быть получена путем численного решения уравнения (34) в п. 2.4.1.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Уравнение (78) базируется на результатах измерений, проводимых в течение периода от одного до трех лет на 27 линиях в частотном диапазоне от 12,3 до 83 ГГц и для длины трассы в диапазоне от 1,2 до 43 км в Бразилии, Норвегии, Японии и России.

Интенсивность сбоев ( $OI$ ) определяется числом событий неготовности в год. Для цифровой радиолинии событие неготовности наступает тогда, когда происходит превышение заданного коэффициента ошибок по битам в периоды более 10 секунд. Для прогнозирования интенсивности сбоев, обусловленных затуханием в дожде, в однопролетных линиях следует использовать следующий метод:

*Шаг 1:* Получить значение процента времени  $p(M)$ , в течение которого превышает запас линии  $M$  (дБ) на затухание в дожде. Если местные источники, содержащие результаты долгосрочных измерений, такой информацией не располагают, она может быть получена путем решения уравнения (34) в п. 2.4.1 для  $A_p = M$ .

*Шаг 2:* Оценка интенсивности сбоев вследствие дождя определяется следующим образом:

$$OI(M) = N_{10s}(M), \quad (79)$$

где  $M$  (дБ) – запас линии, связанный с коэффициентом ошибок по битам или заданным коэффициентом ошибок по битам, а  $N_{10s}$  определяется с помощью уравнения (78).

Основываясь на наборе измерений (выполненных для трассы длиной 15 км на частоте 18 ГГц на Скандинавском полуострове), 95–100% всех событий дождя, превышающих примерно 15 дБ, могут быть приписаны неготовности. При такой известной доле событий неготовность может быть получена путем умножения этой доли на общий процент времени, когда данное затухание  $A$  превышает, как определено по методу в п. 2.4.1.

## 2.4.6 Затухание в дожде в многопролетных сетях

Существуют несколько конфигураций множества пролетов, представляющих интерес в сетях связи точка-точка, в которых определенную роль играет структура гидрометеоров. Эти конфигурации включают серию пролетов в многопролетной сети и несколько таких серий пролетов в сети с разнесенными маршрутами.

### 2.4.6.1 Длина отдельных пролетов в тандемной сети

Результирующее качество передачи тандемной сети существенно зависит от характеристик распространения радиоволн на ее отдельных пролетах. Иногда можно реализовать одно и то же физическое соединение, пользуясь различными сочетаниями пролетов разной длины. Увеличение длины отдельных пролетов неизбежно ведет к возрастанию вероятности сбоев на этих пролетах. С другой стороны, такое решение могло бы означать, что потребовалось бы меньше пролетов, причем результирующее качество работы транзитной сети бы и не ухудшаться.

### 2.4.6.2 Коррелированные замирания на тандемных пролетах

Если бы возникновение дождя было событием статистически независимым от местности, то суммарную вероятность появления одновременных замираний на серии последовательных пролетов можно было бы получить с помощью следующей аппроксимации:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (80)$$

где  $P_i$  – вероятность появления замирания на  $i$ -м пролете радиолинии, состоящей из  $n$  звеньев.

С другой стороны, если события, связанные с возникновением осадков, коррелированы между собой в пределах конечной площади, то затухания на двух или более звеньях многопролетной релейной системы также будут коррелированы, и в этом случае общую вероятность появления замираний можно определить как:

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i, \quad (81)$$

где  $K$  – коэффициент преобразования, учитывающий общий эффект корреляции между возникновением дождей.

Этому вопросу посвящено несколько исследований. В одном из них рассматривается мгновенная корреляция между возникновением дождей в разных местах вдоль трассы восток-запад, приблизительно параллельной преобладающему направлению движения бурь. В другом – проводится мониторинг затуханий для серии коротких пролетов, ориентированных с севера на юг, или приблизительно перпендикулярных преобладающему направлению движения бурь в сезон максимальных дождей.

В том случае, когда многопролетная линия была параллельна направлению движения бури, эффекты корреляции для пролетов длиной  $l$  более 40 км каждый оказались невелики. В этом случае поправочный коэффициент  $K$  превышал величину 0,9 при проценте отказов вследствие дождя, равном 0,03%, и им вполне можно было пренебречь (см. рисунок 5). Однако для более коротких пролетов эффект корреляции становится более ощутимым: суммарная вероятность возникновения отказов для 10 пролетов длиной 20, 10 и 5 км каждый, равна приблизительно 80%, 65% и 40% от математического ожидания (поправочные коэффициенты равны 0,8; 0,65; 0,4). Видно, что влияние корреляции между событиями, связанными с возникновением дождя, сильнее для первых нескольких пролетов, а затем, по мере того как общая длина цепи увеличивается, это влияние уменьшается.

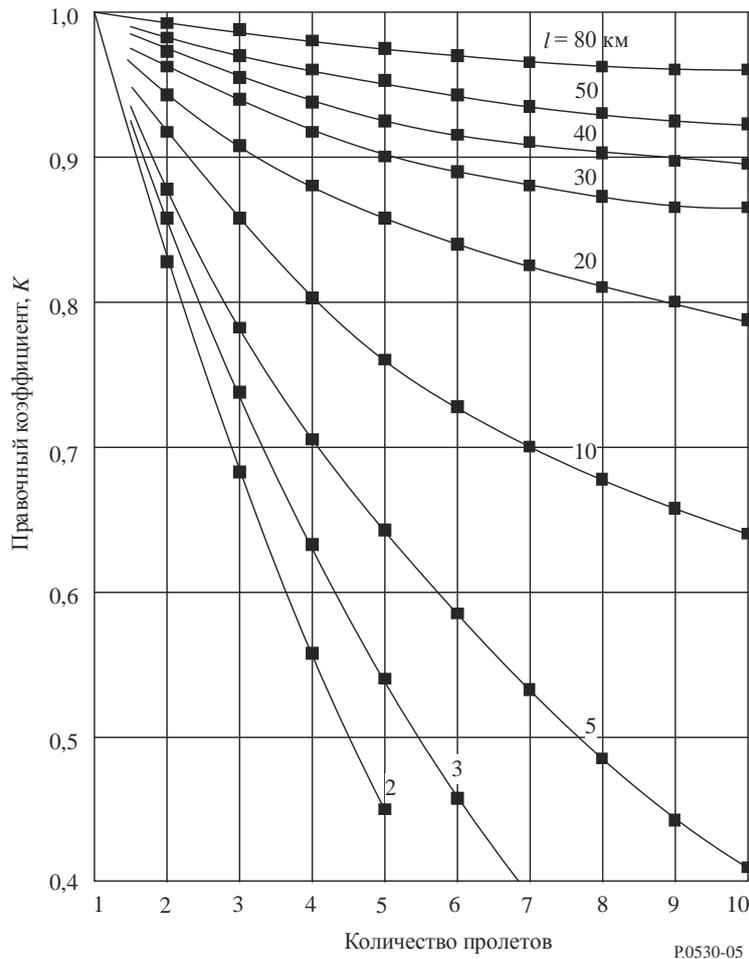
На рисунке 6 показаны поправочные коэффициенты для нескольких уровней вероятности для случая распространения радиоволн в направлении, перпендикулярном преобладающему направлению движения бури. В этом случае поправочные коэффициенты убывают быстрее для первых нескольких пролетов (что свидетельствует о более сильной корреляции на коротком расстоянии по сравнению с ситуацией, когда распространение происходит параллельно движению бури), а затем остаются практически постоянными (что говорит о более слабой корреляции на больших расстояниях).

### 2.4.6.3 Сети с разнесением маршрутов

Используя тот факт, что горизонтальная структура осадков может существенно изменяться в пределах пространства размером в долю километра, сети с разнесением маршрутов могут содержать два или более последовательных пролета на двух или нескольких маршрутах с разнесением. Хотя информация об улучшении качества приема за счет разнесения для сетей с полным разнесением маршрутов отсутствует, имеется некоторый небольшой объем информации об элементах такой сети. Элементы этой сети включают две трассы, сходящиеся в сетевом узле, и приблизительно параллельные трассы, разделенные в горизонтальной плоскости.

РИСУНОК 5

Поправочный коэффициент для общего затухания в дожде на серии последовательных пролетов одинаковой длины,  $l$ , при вероятности превышения, равной 0,03% для каждой линии



#### 2.4.6.3.1 Элементы сходящихся трасс

Информацию о коэффициенте улучшения за счет разнесения для сходящихся трасс в диапазоне КНЧ спектра можно найти в Рекомендации МСЭ-R P.1410. Хотя этот коэффициент выведен для применений "точка-зона", его можно использовать в целях получения некоторой общей картины улучшения, обеспечиваемой такими элементами сети с разнесенными (или объединенными) маршрутами "точка-точка", число которых будет составлять два.

Вследствие произвольного временного и пространственного распределения интенсивности дождевых осадков, сходящиеся линии "точка-точка" будут каждый момент испытывать различную глубину затухания. В результате может наблюдаться ухудшение отношения сигнал/помеха между линиями от пользователей в различных угловых секторах, когда желаемый сигнал ослабляется (затухает) на трассе за счет дождя, а мешающий сигнал не ослабляется.

Интегральная функция распределения дифференциального затухания в дожде (DRA) для двух сходящихся линий, работающих на той же частоте, может быть оценено с помощью следующих шагов:

*Шаг 1:* Аппроксимировать годовое распределение затухания в дожде  $A_i$  (в дБ) по каждой трассе  $i = 1, 2$  с помощью логарифмически нормального распределения:

$$P(A_i) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\ln A_i - \ln A_{mi}}{\sqrt{2} S_{ai}} \right), \quad (82)$$

где  $\operatorname{erfc}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$  – дополнительная функция ошибок. Рассчитать  $A_{mi}$  и  $S_{ai}$ , рекомендуется процедура подбора либо по имеющимся результатам местных изменений, либо по распределению затухания в дожде, приведенному в п. 2.4.1 Рекомендации МСЭ-R P.530-12. Эта процедура подробно описана в Приложении 2 в Рекомендации МСЭ-R P.1057-2.

*Шаг 2:* Определить постоянную неоднородности дождя  $D_r$ , то есть расстояние в км; коэффициент корреляции становится равным  $\sqrt{2}/2$ . Простое правило расчета  $D_r$  зависит от абсолютной широты  $|lat|$  местоположения:

$$D_r = \begin{cases} 1 & |lat| \leq 23^\circ \\ 1,5 & 23^\circ < |lat| \leq 50^\circ \\ 1,75 & |lat| > 50^\circ \end{cases} \quad (83)$$

*Шаг 3:* Определить характеристическое расстояние области дождя как  $D_c = 20 \times D_r$ .

*Шаг 4:* Оценить пространственный параметр  $H_i$ ,  $i = 1, 2$ , по каждой альтернативной трассе длиной  $L_i$ :

$$H_i = 2L_i D_r \sinh^{-1}(L_i/D_r) + 2D_r^2 \left(1 - \sqrt{(L_i/D_r)^2 + 1}\right), \quad i = 1, 2. \quad (84)$$

*Шаг 5:* Вычислить пространственный параметр  $H_{12}$  между двумя трассами:

$$H_{12} = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \rho_0(d) dl_1 dl_2, \quad (85)$$

где:

$$\rho_0(d) = \begin{cases} \frac{D_r}{\sqrt{D_r^2 + d^2}} & d \leq D_c \\ \frac{D_r}{\sqrt{D_r^2 + D_c^2}} & d > D_c \end{cases}, \quad (86)$$

а расстояние двух точек альтернативных трасс, образующих угол  $\phi$ , определяется следующим образом:

$$d^2 = \ell_1^2 + \ell_2^2 - 2\ell_1\ell_2 \cos\phi, \quad 0 < \ell_1 \leq L_1, \quad 0 < \ell_2 \leq L_2. \quad (87)$$

*Шаг 6:* Рассчитать коэффициент корреляции затухания в дожде:

$$\rho_a = \frac{1}{S_{a1}S_{a2}} \ln \left[ \frac{H_{12}}{\sqrt{H_1 H_2}} \left( e^{S_{a1}^2} - 1 \right)^{1/2} \left( e^{S_{a2}^2} - 1 \right)^{1/2} + 1 \right]. \quad (88)$$

*Шаг 7:* Интегральная функция распределения DRA  $A_1$ - $A_2$ , превышающего порог  $\delta A$  (в дБ) определяется с помощью уравнения:

$$P_{DRA} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{u_{01}}{\sqrt{2}} \right) - \frac{1}{2} \int_{u_{01}}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{u_1^2}{2} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{u_{02} - \rho_a u_1}{\sqrt{2} \sqrt{1 - \rho_a^2}} \right) du_1, \quad (89)$$

где:

$$u_i = \frac{\ln A_i - \ln A_{mi}}{S_{ai}}, \quad i = 1, 2 \quad (90)$$

$$u_{01} = \frac{\ln \delta a - \ln A_{m1}}{S_{a1}} \quad (91)$$

$$u_{02} = \frac{\ln(A_{m1} \exp(u_1 S_{a1}) - \delta a) - \ln A_{m2}}{S_{a2}} \quad (92)$$

### 2.4.6.3.2 Параллельные трассы, разнесенные в горизонтальной плоскости

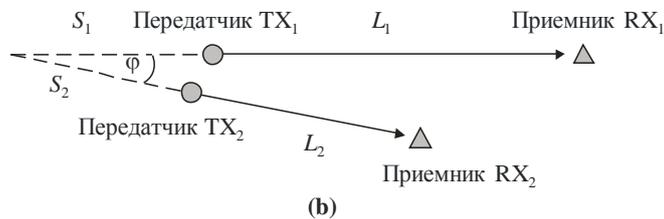
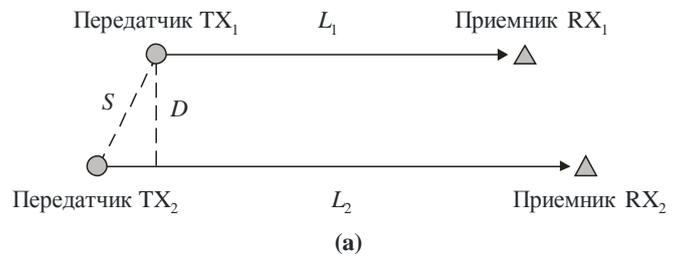
Экспериментальные данные, полученные в Соединенном Королевстве в полосе частот 20–40 ГГц, свидетельствуют о том, что надежность радиолинии можно повысить благодаря использованию переключаемых разнесенных трасс, как показано на рисунке ба. Выигрыш от разнесения (т. е. разность между затуханиями (дБ), превышаемыми для определенного процента времени на одиночной линии и одновременно на двух параллельных линиях):

- имеет тенденцию уменьшаться при увеличении длины трассы, начиная с 12 км, при заданном проценте времени и при заданном разnose трасс в поперечном направлении;
- обычно больше при разnose на 8 км, чем на 4 км, хотя увеличение разноса до 12 км не дает дальнейшего улучшения;
- в частотном диапазоне 20–40 ГГц при заданной геометрии не зависит существенным образом от частоты; и
- изменяется приблизительно от 2,8 дБ для 0,1% времени до 4,0 дБ для 0,001% времени при разnose на 8 км и примерно таких же длинах трасс. Соответствующие значения для разноса на 4 км составляют приблизительно от 1,8 до 2,0 дБ.

Для получения улучшения качества за счет разнесения  $I$  и усиления за счет разнесения  $G$  для полностью параллельных трасс требуется выполнение следующих шагов:

РИСУНОК 6

- (а) Геометрия разнесения параллельных маршрутов.  
 (б) Геометрия разнесения маршрутов, отклоняющаяся от полностью параллельной.



P.0530-06

*Шаг 1:* Выполнить шаги 1–4, указанные в п. 2.4.6.3.1.

*Шаг 2:* Рассчитать  $H_{12}$  по уравнению (84). Вследствие изменения геометрии со сходящихся на параллельные трассы изменяется шаг 5 процедуры, описанной в п. 2.4.6.3.1. В частности, определение расстояния  $d$  между двумя точками элементов альтернативных трасс, которое используется для расчета коэффициента корреляции  $\rho_0(d)$  в (86), в данном случае выражается следующим образом:

$$d^2 = S^2 + 2\sqrt{S^2 - D^2}|\ell_1 - \ell_2| + (\ell_1 - \ell_2)^2 \quad 0 < \ell_1 \leq L_1, \quad 0 < \ell_2 \leq L_2, \quad (93)$$

где параллельные трассы разделены в горизонтальной плоскости расстоянием  $D$ , а  $S$  – расстояние между двумя передатчиками (см. рисунок 6а).

*Шаг 3:* Повторить шаг 6 из п. 2.4.6.3.1, используя значение  $H_{12}$ , полученное в шаге 2.

*Шаг 4:* Интегральная функция распределения параллельной конфигурации с разнесением, превышающая глубину замирания  $A_i$ , определяется следующим образом:

$$P_d(A_i) = \frac{1}{2} \int_{u_2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{u_1 - \rho_a u}{\sqrt{2}\sqrt{1-\rho_a}}\right) du, \quad (94)$$

где  $u_i$ ,  $i = 1, 2$ , определено в уравнении (90).

*Шаг 5:* Улучшение качества за счет разнесения  $I$  при эталонном уровне затухания  $A_i$  определяется на основе соотношения:

$$I(A_i) = \frac{P(A_i)}{P_d(A_i)}, \quad i=1,2. \quad (95)$$

*Шаг 6:* Усиление за счет разнесения  $G$  при эталонной процентной доле  $t$  определяется на основе соотношения (см. Примечание 1):

$$G(A_i) = A_i(t) - A_d(t), \quad i=1,2. \quad (96)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для расчета  $A_i(t)$  и  $A_d(t)$  в уравнении (96) уравнение (82) и (94) должны быть обратными.

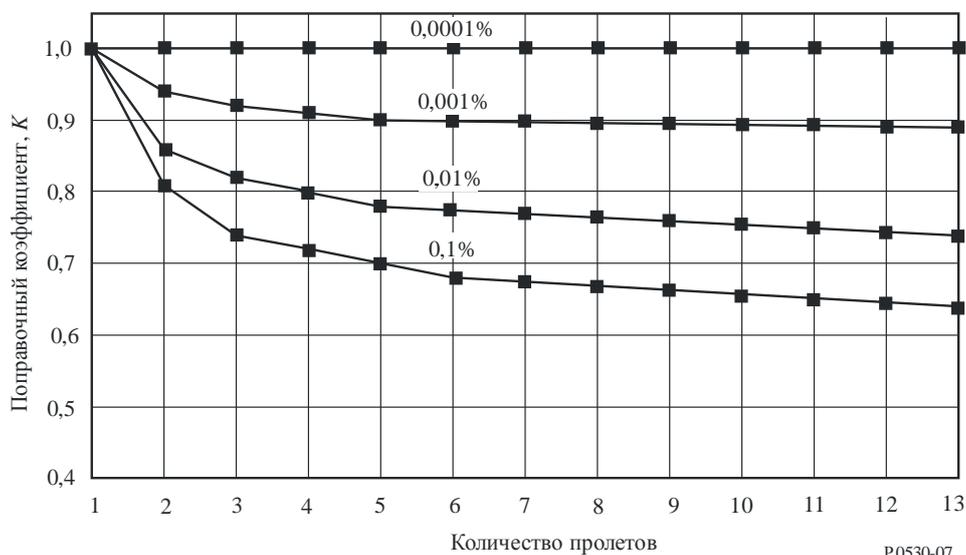
Для обращения уравнения (94) следует применить численный анализ.

В случае двух альтернативных трасс, в существенной степени отклоняющихся, чтобы быть полностью параллельными между собой, как показано на рисунке 6б, продолжения этих двух линий пересекаются в определенной точке на расстоянии  $S_1$  и  $S_2$  от двух передатчиков. Аналогично для определения показателя качества за счет разнесения (усиление и улучшение) следует повторить шаги 1–6 данного раздела. Вместе с тем в этом случае  $d$  определяется уравнением (87), а  $H_{12}$  – выражается следующим образом:

$$H_{12} = \int_{S_1}^{S_1+L_1} \int_{S_2}^{S_2+L_2} \rho_0(d = |\ell_1 - \ell_2|) d\ell_1 d\ell_2. \quad (97)$$

РИСУНОК 7

Поправочный коэффициент для общего затухания в дожде на серии последовательных пролетов длиной около 4,6 км каждый для различных уровней вероятности превышения на каждом пролете (май 1975 г. – март 1979 г.)



P.0530-07

#### 2.4.6.4 Трассы с пассивными ретрансляторами

##### 2.4.6.4.1 Ретрансляторы с плоскими отражателями

Для трасс с двумя или более ветвями ( $N$  = общее число ветвей), на которых используются плоские пассивные отражатели и ветви которых расположены параллельно с точностью в пределах нескольких градусов (см. Примечание 1), вычислить величину затухания в дожде на всей трассе, подставляя длину трассы согласно выражению.

$$d = d_{leg1} + d_{leg2} + \dots + d_{legN} \quad \text{км} \quad (98)$$

в метод п. 2.4.1, учитывая при расчете коэффициент уменьшения расстояния из уравнения (32).

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – В настоящее время не может быть дано определенного указания относительно того, насколько точно ветви трассы должны быть параллельны. Если эти ветви не параллельны, то подход в уравнении (98) приведет к тому, что величина коэффициента уменьшения  $r$  в уравнении (32) будет меньше, чем она должна быть, и таким образом фактическое общее затухание будет недооценено. Возможным решением этой проблемы могло бы быть использование при вычислении единственной величины коэффициента уменьшения как уравнения (98), так и длины трассы, полученной путем соединения концов первой и последней ветви, и усреднение полученных результатов.

Альтернативным подходом могла бы быть обработка ветвей как независимых трасс и применение информации, содержащейся в п. 2.4.6.

##### 2.4.6.4.2 Ретрансляторы с антеннами, задние лепестки которых направлены навстречу друг другу

Если в двух или нескольких ветвях трассы используется одна и та же поляризация, вычисляется статистика затухания с использованием метода в п. 2.4.6.4.1 для плоских отражателей.

Если в ветвях трассы используются различные виды поляризации, то для получения процентов времени  $p_H$  и  $p_V$ , в течение которых превышает желаемое затухание (см. Примечание 1) для горизонтальной и вертикальной поляризации, соответственно, применяется метод в п. 2.4.1 вместе с уравнением (98) для этих двух видов поляризации. Следует использовать уравнение (98) при вычислении общей длины трассы  $d_H$  для этих ветвей с применением горизонтальной поляризации, а также при вычислении общей длины трассы  $d_V$  для этих ветвей с использованием вертикальной поляризации. Затем вычислить процент времени  $p$ , в течение которого данное затухание превышает на всей трассе, из выражения (см. Примечание 2):

$$p = \frac{p_H d_H + p_V d_V}{d_H + d_V} \quad \% . \quad (99)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Поскольку метод в п. 2.4.1 позволяет определить величину затухания, превышаемого в течение заданного процента времени, то для получения процента времени превышения заданного затухания его следует инвертировать в числовом выражении.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Если ветви данной трассы существенно отклоняются от взаимной параллельности, то возможно, что для повышения точности мог бы быть применен подход, аналогичный предложенному в Примечании 1 в п. 2.4.6.4.1. В этом случае указанный подход должен будет применяться при вычислении затухания для каждого вида поляризации отдельно.

### 2.4.7 Прогнозирование сбоев из-за осадков

При проектировании цифровых линий рассчитать вероятность  $P_{rain}$  превышения затухания в дожде, равного запасу на амплитудное замирание  $F$  (дБ) (см. п. 2.3.5) для заданного значения BER, по формуле:

$$P_{rain} = p/100, \quad (100)$$

где  $p$  (%) – процент времени среднего года, рассчитанный с помощью уравнения (34), п. 2.4.1, в течение которого превышает величина затухания в дожде  $F$  (дБ).

## 3 Колебания углов прихода/выхода радиоволн

Аномальные значения градиентов индекса рефракции вдоль трассы в условиях ясного неба могут вызвать сильные колебания углов выхода и прихода передаваемых и принимаемых радиоволн. Эти колебания существенно зависят от частоты и происходят преимущественно в вертикальной плоскости антенн. Диапазон изменения углов оказывается больше во влажных прибрежных районах, чем в сухих внутренних районах. Никаких существенных колебаний при выпадении атмосферных осадков не зафиксировано.

Указанное явление может играть существенную роль на протяженных трассах, для которых используются остронаправленные антенны с большим коэффициентом усиления. Если диаграмма направленности антенны слишком узкая, то прямая исходящая/приходящая волна может достаточно сильно отклоняться от оси, что может привести к сильным замираниям (см. п. 2.3). Более того, если юстировка антенн производилась в период крайне аномальных углов прихода, она может казаться неоптимальной. Таким образом, при юстировке антенн на критических трассах (например, на протяженных трассах в прибрежной зоне) может оказаться желательным проверять юстировку несколько раз в течение нескольких дней.

## 4 Уменьшение избирательности по кроссполяризации (XPD)

В случае значительного уменьшения избирательности по кроссполяризации (XPD) может возникнуть помеха в совмещенном канале, а также в соседнем канале, хотя и в меньшей степени. Уменьшение XPD, которое может происходить как в условиях ясного неба, так и в случае атмосферных осадков, необходимо принимать во внимание.

### 4.1 Прогнозирование сбоев XPD в условиях ясного неба

Уменьшение XPD, происходящее в течение малых процентов времени, определяется совместным влиянием многолучевого распространения радиоволн и диаграммой направленности антенны для кроссполяризации. Для расчета влияния этого уменьшения на характеристики линии используется следующая пошаговая процедура:

Шаг 1: Рассчитать:

$$XPD_0 = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{для } XPD_g \leq 35 \\ 40 & \text{для } XPD_g > 35, \end{cases} \quad (101)$$

где  $XPD_g$  – минимальное значение XPD в осевом направлении передающей и приемной антенн, гарантированное производителем, т. е. минимальные XPD передающей и приемной антенн в осевом направлении.

**Шаг 2:** Определить параметр, отражающий степень активности многолучевости:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}}, \quad (102)$$

где  $P_0 = p_w/100$  – показатель частоты возникновения многолучевости, соответствующий проценту времени  $p_w$  (%) среднего наихудшего месяца, в течение которого превышает уровень  $A = 0$  дБ, в соответствии с уравнением (7) или (8), в зависимости от ситуации.

**Шаг 3:** Определить:

$$Q = -10 \log \left( \frac{k_{XP} \eta}{P_0} \right), \quad (103)$$

где:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{одна передающая антенна} \\ 1 - 0,3 \exp \left[ -4 \times 10^{-6} \left( \frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{две передающие антенны} \end{cases} \quad (104)$$

В том случае, когда две различные антенны передают ортогонально поляризованные сигналы,  $s_t$  (м) будет обозначать вертикальное разнесение, а  $\lambda$  (м) – длину волны несущей.

**Шаг 4:** Рассчитать параметр  $C$  по следующей формуле:

$$C = XPD_0 + Q. \quad (105)$$

**Шаг 5:** Рассчитать вероятность сбоя  $P_{XP}$  за счет кроссполяризации в условиях ясного неба:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}}, \quad (106)$$

где  $M_{XPD}$  (дБ) – запас на эквивалентный XPD для эталонного BER, рассчитываемый как:

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{без XPIС} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{с XPIС} \end{cases} \quad (107)$$

Здесь  $C_0/I$  – отношение несущей к помехе для эталонного BER, которое можно получить или путем имитационного моделирования, или с помощью измерений.

XPIF – коэффициент улучшения за счет кроссполяризации, измеренный в лабораторных условиях и показывающий разницу в значениях развязки по кроссполяризации, XPI, при достаточно большом отношении несущей к помехе (обычно 35 дБ) и заданном значении BER системы в присутствии подавителя помех, вызванных кроссполяризацией (XPIС), и без него. Обычно XPIF имеет величину порядка 20 дБ.

## 4.2 Прогнозирование сбоев XPD, вызванных влиянием атмосферных осадков

### 4.2.1 Статистика XPD в условиях атмосферных осадков

Сильный дождь вызывает уменьшение XPD в течение небольших процентов времени. Если для трасс не имеется подробных прогнозов или данных измерений, то грубую оценку безусловного распределения XPD можно получить из интегральной функции распределения затухания в дожде для кополяризованных сигналов (СПА) (см. п. 2.4), пользуясь соотношением равной вероятности:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad \text{дБ} . \quad (108)$$

Коэффициенты  $U$  и  $V(f)$  в общем случае зависят от ряда переменных и эмпирических параметров, в том числе и от частоты  $f$ . Для трасс прямой видимости с малыми углами возвышения и горизонтальной или вертикальной поляризацией, эти коэффициенты можно аппроксимировать выражениями:

$$U = U_0 + 30 \log f. \quad (109)$$

$$V(f) = 12,8 f^{0,19} \quad \text{для } 8 \leq f \leq 20 \text{ ГГц} . \quad (110)$$

$$V(f) = 22,6 \quad \text{для } 20 < f \leq 35 \text{ ГГц}$$

Среднее значение  $U_0$ , равное приблизительно 15 дБ, было получено для затуханий свыше 15 дБ, причем во всех измерениях нижняя граница  $U_0$  составляла 9 дБ.

Изменчивость значений  $U$  и  $V(f)$  такова, что различие между значениями CPA для вертикальной и горизонтальной поляризаций незначительно с точки зрения вычисления XPD. Пользователю рекомендуется при работе с уравнением (108) использовать значение CPA для круговой поляризации.

Долгосрочная статистика XPD, полученная на одной частоте, может быть пересчитана для другой частоты с помощью следующей полуэмпирической формулы:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log (f_2 / f_1) \quad \text{для } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ ГГц} , \quad (111)$$

где  $XPD_1$  и  $XPD_2$  – значения XPD, не превышаемые в течение одного и того же процента времени на частотах  $f_1$  и  $f_2$ .

На соотношение между XPD и CPA влияет много факторов, в том числе остаточное значение XPD антенны, которое ранее не принималось во внимание. Точность уравнения (110) минимальна при больших различиях соответствующих частот. Оно наиболее точно, если  $XPD_1$  и  $XPD_2$  соответствуют одному типу поляризации (горизонтальной или вертикальной).

#### 4.2.2 Пошаговая процедура прогнозирования сбоев, вызванных влиянием осадков

*Шаг 1:* Определить с помощью уравнения (34) затухание на трассе,  $A_{0,01}$  (дБ), превышаемое для 0,01% времени.

*Шаг 2:* Определить эквивалентное затухание на трассе,  $A_p$  (дБ):

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF)/V)} , \quad (112)$$

где  $U$  рассчитывается с помощью уравнения (109), а  $V$  – с помощью уравнения (110),  $C_0/I$  (дБ) – отношение несущей к помехе, определенное для эталонного BER без XPIС, а XPIF (дБ) – коэффициент улучшения за счет кроссполяризации для эталонного значения BER.

Если устройство XPIС не используется, то XPIF = 0.

*Шаг 3:* Определить следующие параметры:

$$m = \begin{cases} 23,26 \log [A_p / 0,12 A_{0,01}] & \text{если } m \leq 40 \\ 40 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (113)$$

и

$$n = \left( -12,7 + \sqrt{161,23 - 4m} \right) / 2. \quad (114)$$

Корректные значения для  $n$  лежат в диапазоне от  $-3$  до  $0$ . Заметим, что в некоторых случаях, особенно, когда используется устройство XPRC,  $n$  может быть меньше  $-3$ . Если это имеет место, то следует помнить, что значения  $p$  меньше  $-3$  приведут к значениям BER при сбоях  $< 1 \times 10^{-5}$ .

*Шаг 4:* Определить вероятность сбоя по формуле:

$$P_{XPR} = 10^{(n-2)}. \quad (115)$$

## 5 Искажения, обусловленные явлениями, связанными с распространением радиоволн

Основная причина искажений на линиях прямой видимости в диапазонах УВЧ и СВЧ – это зависимость амплитуды сигнала и групповой задержки многолучевого распространения в условиях ясного неба от частоты. В аналоговых системах увеличение запаса на замирание будет улучшать характеристики системы, поскольку при этом уменьшается влияние теплового шума. Однако в цифровых системах использование большего запаса на замирание не поможет, если замирание является частотно-избирательным и вызывает ухудшение рабочих характеристик.

Наиболее часто канал распространения моделируется в предположении, что сигнал распространяется от передатчика к приемнику по нескольким трассам или в виде нескольких лучей. Это означает, что существует прямая трасса, проходящая через атмосферу, и может быть одна или несколько дополнительных трасс за счет отражения сигнала от земли и/или его преломления в атмосфере. Если прямой сигнал и отраженный сигнал примерно такой же амплитуды, но со значительной задержкой поступают на приемник, то могут возникнуть межсимвольные помехи, ведущие к ошибке при детектировании информации. Методы прогнозирования характеристик основаны на использовании такой многолучевой модели путем объединения различных переменных, таких как задержка (разница во времени прихода первого луча и остальных) и распределения амплитуд, при условии корректности моделей, описывающих элементы оборудования, такие как модуляторы, компенсаторы, схемы упреждающей коррекции ошибок (FEC) и т. п. Хотя существует множество методов, все их можно разбить на три основных класса в зависимости от того, на чем они основаны – на использовании данных о сигнатуре системы, о линейном амплитудном искажении (LAD) или о запасе на суммарное замирание. Подход, основанный на использовании данных о сигнатуре, часто базируется на имитационной двулучевой лабораторной модели в сочетании с другой информацией, как например, частота возникновения многолучевости и характеристики линии. Подход, основанный на данных о LAD, связан с оценкой распределения амплитудных искажений на рассматриваемой трассе, которые наблюдались бы на двух разных частотах радиодиапазона, и использованием характеристик модулятора и компенсатора и т. д. Аналогично в методе, в котором за основу принят запас на суммарное замирание, используются оценки статистических распределений амплитуд сигналов, а также информация об оборудовании, как и в предыдущем методе. Метод, рекомендуемый для прогнозирования ошибок, основан на использовании данных о сигнатуре и изложен в п. 5.1.

Считается, что искажением, обусловленным осадками, можно пренебречь, во всяком случае, это значительно менее важная проблема, чем затухание из-за осадков. Известно, что искажение возникает в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн, но его влияние на работу систем пока до конца не ясно.

### 5.1 Прогнозирование сбоев в незащищенных цифровых системах

В данном случае вероятность сбоев определяется как вероятность того, что BER превысит заданное пороговое значение.

*Шаг 1:* Вычислить среднюю временную задержку по формуле:

$$\tau_m = 0,7 \left( \frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad \text{нс}, \quad (116)$$

где  $d$  – длина трассы (км).

Шаг 2: Рассчитать параметр многолучевой активности,  $\eta$ , по формуле, приведенной в п. 4.1, шаг 2.

Шаг 3: Рассчитать вероятность селективных сбоев, используя соотношение:

$$P_s = 2,15\eta \left( W_M \times 10^{-B_M/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-B_{NM}/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right), \quad (117)$$

где:

$W_x$ : ширина сигнатуры (ГГц);

$B_x$ : глубина сигнатуры (дБ);

$\tau_{r,x}$ : эталонное значение задержки (нс), которое используется при определении сигнатуры, причем индекс  $x$  означает замирание либо с минимальной ( $M$ ), либо с неминимальной ( $NM$ ) фазой.

Если известен только нормированный параметр системы,  $K_n$ , вероятность селективных сбоев в уравнении (117) может быть вычислена как:

$$P_s = 2,15\eta (K_{n,M} + K_{n,NM}) \frac{\tau_m^2}{T^2}, \quad (118)$$

где:

$T$ : период бода системы (нс);

$K_{n,x}$ : нормированный параметр системы, причем индекс  $x$  означает замирание либо с минимальной ( $M$ ), либо с неминимальной ( $NM$ ) фазой.

Определения параметров сигнатуры и описание способа ее получения приведены в Рекомендации МСЭ-R F.1093.

## 6 Способы уменьшения влияния многолучевого распространения

При проектировании линии должно учитываться влияние относительно медленного не избирательного по частоте замирания (т. е. амплитудного замирания), возникающего вследствие расхождения лучей, и более быстрого частотно-избирательного замирания, обусловленного многолучевым распространением радиоволн. Существует ряд доступных методов для смягчения этих влияний, большинство из которых одновременно смягчают оба вида влияния. Те же методы зачастую смягчают также уменьшение избирательности по кроссполаризации. Их можно разделить на методы, не требующие применения определенного вида разнесенного приема или передачи, и методы, требующие разнесения.

Поскольку по экономическим причинам желательно, по возможности, избегать применения разнесения, в п. 6.1 сначала рассматриваются стратегии и методы, которые не требуют разнесения. Впрочем, эти стратегии и методы подходят также для систем с разнесением и должны применяться в удобных случаях, даже если они могут оказаться менее необходимыми. Методы разнесения обсуждаются в п. 6.2.

### 6.1 Методы без разнесения

Для уменьшения влияния замираний вследствие многолучевости без разнесения существуют несколько методов, которые могут применяться, если линия проходит либо между существующими мачтами, либо между новыми мачтами, которые будут построены. Эти методы полезно рассмотреть при реализации одной или нескольких из нижеследующих стратегий:

*Стратегия А:* уменьшение случаев появления значительных амплитудных замираний из-за механизмов, происходящих в атмосфере (расширение луча, антенная развязка и многолучевость при распространении в атмосфере; см. п. 2.3);

*Стратегия В:* уменьшение случаев появления значительных отражений от поверхности;

*Стратегия С:* уменьшение относительной задержки отражений от поверхности по отношению к атмосферной волне.

### **6.1.1 Увеличение наклона трассы**

Линии должны прокладываться с использованием неровностей местности такими способами, которые увеличивают наклон трасс (иногда это называется методом "высокий-низкий"), поскольку в данных случаях может быть реализована описанная выше стратегия А и в некоторой степени также стратегия В. Такой подход должен осуществляться совместно с более конкретными усилиями по использованию экранирования местностью для уменьшения уровней отражения от поверхности (стратегия В; см. п. 6.1.2), поскольку эти два метода тесно связаны друг с другом.

Когда мачты уже установлены на своих местах, высота антенны на одном конце трассы может быть уменьшена, чтобы осуществить указанный выше подход при условии выполнения правил просвета в п. 2.2.2.

### **6.1.2 Уменьшение влияния отражений от поверхности**

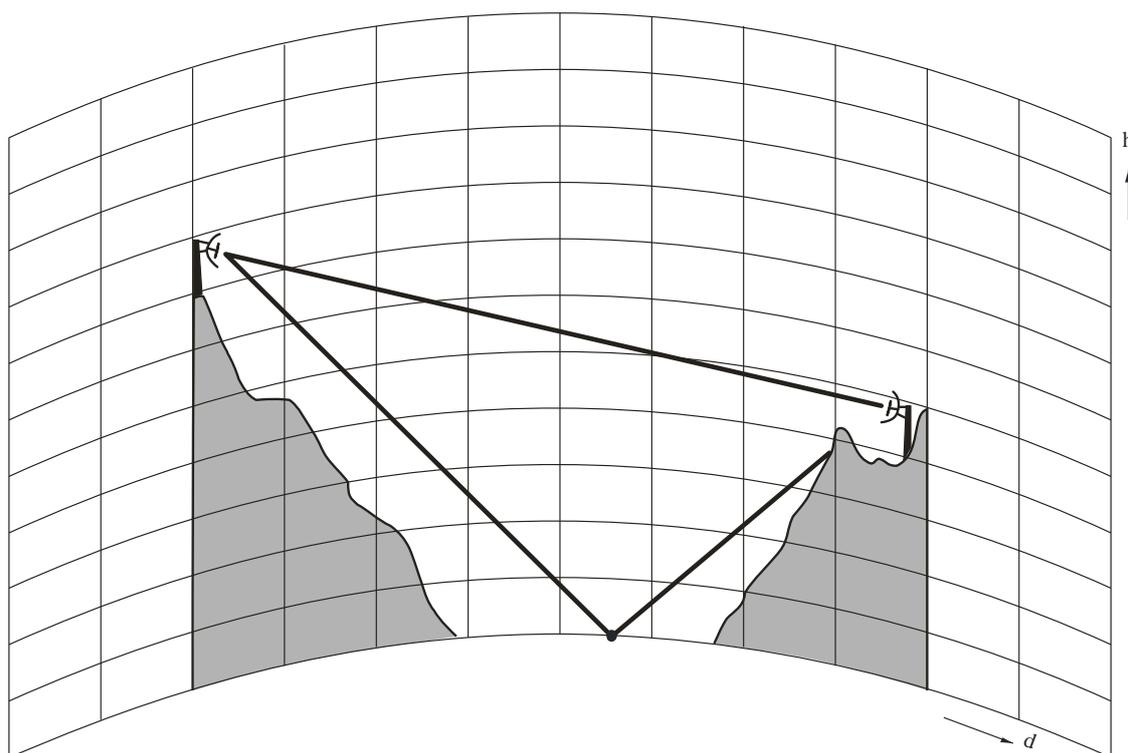
Линии должны прокладываться там, где можно уменьшить случаи появления значительных зеркальных и диффузных отражений от поверхности (или, по крайней мере, превратить значительные зеркальные отражения в более мелкие диффузные отражения), тем самым уменьшая случаи появления замираний и искажений из-за поверхностной многолучевости (стратегия В). Для выполнения таких задач существуют несколько методов, большинство из которых связаны друг с другом. Поэтому использование одного метода не должно осуществляться без одновременного рассмотрения других. Эти методы заключаются в следующем.

#### **6.1.2.1 Экранирование точки отражения**

Один из методов заключается в том, чтобы воспользоваться холмами, горами или зданиями вдоль трассы для экранирования антенн от более опасных с точки зрения помех поверхностей с зеркальным отражением вдоль трассы (например, водные поверхности, равнины, гладкие вершины холмов, не покрытые деревьями, верхние части зданий; см. рисунок 8). В идеальном случае холмы или горы должны быть покрыты растительностью для дополнительного снижения уровня поля, дифрагированного на них. Безусловно, экранирование отражающих поверхностей легче выполнить при уменьшении просвета на трассе (см. п. 6.1.3).

РИСУНОК 8

## Пример экранирования антенны от зеркального отражения



P.0530-08

Анализ путем отслеживания траектории лучей для определения подходящего экранирующего препятствия должен проводиться для некоторого диапазона эффективных коэффициентов  $k$ , изменяющихся от  $k_e$  (99,9%) (или некоторой другой минимальной величины) до бесконечности (см. п. 2.2.2). Следует принять меры, чтобы отражение от поверхности блокировалось или, по крайней мере, частично экранировалось для больших значений эффективных коэффициентов  $k$ , а также для медианного значения. Очевидно, что польза от экранирования препятствием в определенной степени теряется, если одна или несколько радиоволн, отраженных поверхностью, являются суперрефрагированными при прохождении над препятствиями, поскольку замирания и искажения из-за поверхностной многолучевости с большей вероятностью наблюдаются при наличии таких условий. Следует также принять меры, чтобы прямая волна не дифрагировала сильнее, чем это допустимо в рамках критериев просвета на трассе при низких значениях эффективных коэффициентов  $k$ , наблюдающихся в условиях субрефракции.

#### 6.1.2.2 Перенос точки отражения на поверхность с худшими коэффициентами отражения

Другим методом является регулирование высоты антенны на одном или обоих концах трассы для переноса точек отражения на более неровную местность или поверхность, покрытую растительностью, чем это было бы возможно в других обстоятельствах. На надводных трассах, например, можно было бы отрегулировать наклон трассы для размещения точек поверхностного отражения на поверхности суши, а не на воде, и даже лучше – на поверхности суши, покрытой деревьями или иной растительностью. Точка отражения перемещается в направлении более низкой антенны и удаляется от поднятой антенны.

Метод определения местоположения возможных зон отражения приведен в п. 6.1.2.3 (шаги 1–3). На достаточно коротких трассах этот метод должен применяться в полном объеме в целях уяснения, может ли быть выбрана высота одной или обеих антенн таким образом, чтобы избежать появления деструктивных помех от зеркальных поверхностных отражений.

Методы расчета или измерения уровня зеркальных поверхностных отражений приведены в п. 6.1.2.4.

### 6.1.2.3 Оптимальный выбор высоты антенн

На достаточно коротких трассах высота одной или обеих антенн может иногда регулироваться так, чтобы любая(ые) волна(ы), отраженная(ые) от поверхности, не создавала(и) деструктивных помех прямой волне для значительного диапазона эффективных значений  $k$ . Как отмечалось в п. 6.1.2.2, регулировка высоты антенн может также использоваться для перемещения точек отражения на поверхность с худшими показателями отражения. Пошаговая процедура для применения обоих методов и определения необходимости разнесения заключается в следующем:

*Шаг 1:* Рассчитать предварительную высоту передающей и приемной антенн, используя правило просвета для неразнесенных систем в п. 2.2.2.1.

*Шаг 2:* Рассчитать высоту передающей и более высокой приемной антенн над возможными зонами зеркального отражения на профиле трассы или вблизи него. Такие зоны, как водоемы, равнины, гладкие вершины холмов, не покрытые деревьями, или верхние части зданий, могут вызывать значительные зеркальные отражения. Эти зоны, конечно, могут быть, а могут и не быть горизонтальными, и их может быть несколько (см. Примечание 1). В то время как некоторые зоны можно определить по картам, другие могут потребовать детального обследования местности вдоль трассы и в непосредственной близости от нее.

Высота  $h_1$  и  $h_2$  антенн над зоной отражения с углом наклона  $v$  (см. Примечание 1) определяется следующим образом (см. рисунок 9):

$$h_1 = h_{1G} + y_1 - y_0 + x_0 \times 10^3 \times \tan v \quad \text{м,} \quad (119)$$

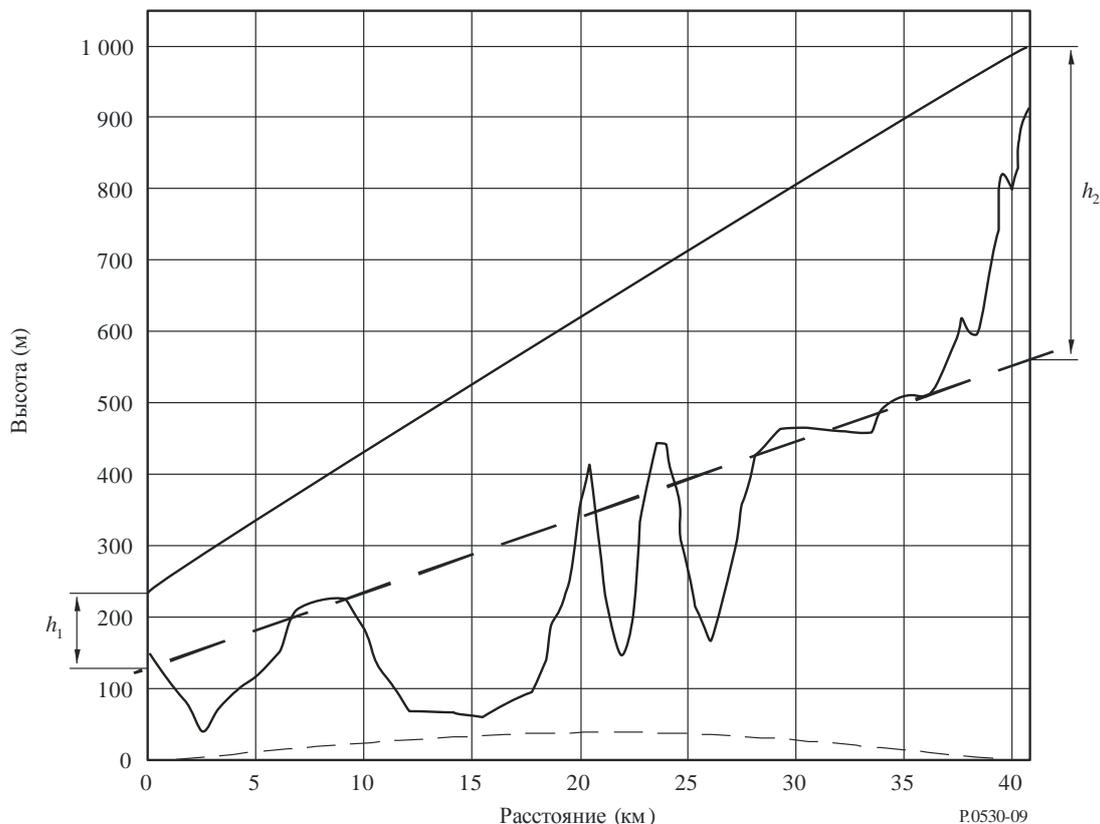
$$h_2 = h_{2G} + y_2 - y_0 - (d - x_0) \times 10^3 \times \tan v \quad \text{м,} \quad (120)$$

где:

- $y_1, y_2$ : высота земли над уровнем моря на станциях 1 и 2, соответственно (м);
- $h_{1G}, h_{2G}$ : высота антенн над землей на станциях 1 и 2, соответственно (м);
- $y_0$ : высота средней точки зоны отражения над уровнем моря (м);
- $x_0$ : расстояние от средней точки зоны отражения до станции 1 (км).

Если зона отражения приходится на море, то необходимо учитывать приливные колебания.

РИСУНОК 9  
Трасса с отражающим рельефом местности



*Шаг 3:* Для диапазона эффективных коэффициентов  $k$ , изменяющихся от  $k_e$  (99,9%) до бесконечности (см. п. 2.2.2; на практике может быть выбрано большое значение  $k$ , такое как  $k = 1,0 \times 10^9$ ), вычислить расстояния  $d_1$  и  $d_2$  от каждой возможной отражающей поверхности до станций 1 и 2, соответственно, из выражений (см. Примечание 2):

$$d_1 = d(1 + b) / 2 \quad \text{км}, \quad (121)$$

$$d_2 = d(1 - b) / 2 \quad \text{км}, \quad (122)$$

где:

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left[ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right], \quad (123)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \times 10^3, \quad (124)$$

$$c = (h_1 - h_2) / (h_1 + h_2), \quad (125)$$

причем  $a_e = k_a$  – это эффективный радиус Земли для заданного коэффициента  $k$  ( $a = 6375$  км представляет собой фактический радиус Земли); в уравнении (120)  $d$  указывается в километрах, а  $h_1$  и  $h_2$  – в метрах.

Если зон зеркального отражения можно избежать путем регулирования высоты одной или обеих антенн в приемлемых границах, соблюдая одновременно правила просвета (шаг 1), приблизительно следует подсчитать изменение и начать снова с шага 2.

*Шаг 4:* В отношении зеркально отражающих поверхностей, которых невозможно избежать, рассчитать разность длин трасс между прямой и отраженной волнами (или лучами) в длинах волн для одного и того же диапазона эффективных значений коэффициента  $k$  из выражения:

$$\tau = \frac{2f}{0,3d} \left[ h_1 - \frac{d_1^2}{12,74k} \right] \left[ h_2 - \frac{d_2^2}{12,74k} \right] \times 10^{-3}. \quad (126)$$

Каждый раз, когда число длин волн,  $\tau$ , является положительной целой величиной по мере изменения  $k$  (т. е. 1, 2 и т. д.), уровень принимаемого сигнала проходит через минимум. Таких условий следует по возможности избегать. Чем больше число целых значений разности  $\tau_{max} - \tau_{min}$  при изменении  $k$  в пределах его диапазона, тем выше вероятность того, что потребуются поиск компромисса для эксплуатационных характеристик и необходимо будет применить определенный вид разнесения.

Если  $\tau_{max} - \tau_{min} < 1$  при изменении  $k$  в пределах соответствующего диапазона, то почти наверняка разнесения можно избежать. Однако на трассах длиной более чем примерно 7,5 км наилучший способ удостовериться в отсутствии необходимости защиты с помощью разнесения – это применить процедуру расчета случаев появления многолучевости согласно п. 2.3, а также процедуру прогнозирования сбоев для незащищенных цифровых систем согласно п. 5.1. В любом случае высота одной или обеих антенн должна регулироваться так, чтобы  $\tau \approx 0,5$  для медианного значения  $k$ .

Если  $\tau_{max} - \tau_{min} \geq 1$ , глубина замираний из-за поверхностной многолучевости и оценка необходимости использования определенного вида разнесения зависят от того, насколько хорошо отражается сигнал (см. пп. 6.1.2.2 и 6.1.2.3) и имеются ли значимые показатели избирательности в отношении поверхностных отражений на одной или обеих антеннах (см. п. 6.1.2.5). Однако следует помнить, что на достаточно протяженных трассах аномальные слои с предельно отрицательными градиентами индекса рефракции могут вызывать замирание прямой волны в результате расширения луча и что отраженная(ые) от поверхности волна(ы) может (могут) одновременно усиливаться в результате энергии, отклоненной от прямой волны в направлении поверхности. Наилучший способ установления необходимости использования защиты с помощью определенного вида разнесения – это применить процедуру расчета случаев появления многолучевости согласно п. 2.3, а также процедуру прогнозирования сбоев для незащищенных цифровых систем согласно п. 5.1.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1.** – Поскольку профиль трассы основан на выборочных высотах с определенными расстояниями между ними, фактический наклон местности будет несколько отличаться на участках между точками выборки на профиле. Считается допустимым небольшое изменение угла наклона, относительно значения, рассчитанного исходя из цифрового профиля (например, значений, соответствующих изменениям на  $\pm 10$  м высоты профиля на одном конце рассматриваемого сегмента профиля). При необходимости может быть проведен визуальный контроль трассы между выборочными точками местности.

В некоторых случаях, когда профиль трассы имеет характер слегка пересеченной местности и его обработка на отдельных сегментах трассы представляется неадекватной, то в этом случае на профиль трассы должна быть помещена кривая регрессии согласно способу, указанному в п. 6.1.2.4.1, и для расчета высот над точками отражения и расстояний от них должны рассматриваться отражения, происходящие от этой кривой. В таком случае шаги в данном пункте и в п. 6.1.2.4.1 нужно рассматривать совместно.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2.** – Для некоторых проектов линий связи может оказаться желательным использование минимального значения эффективного коэффициента  $k$ , меньшего, чем  $k_e$  (99,9%).

#### 6.1.2.4 Выбор вертикальной поляризации

На надводных трассах на частотах выше примерно 3 ГГц целесообразно выбирать вертикальную поляризацию вместо горизонтальной. При углах скольжения более чем примерно  $0,7^\circ$  можно ожидать снижения поверхностного отражения на 2–17 дБ по сравнению с горизонтальной поляризацией.

Более точную оценку эффективного коэффициента отражения площади поверхности, задействованной в зеркальном отражении, можно получить посредством либо вычислений, либо измерений следующим образом:

### 6.1.2.4.1 Расчет эффективного коэффициента отражения поверхности

Эффективный коэффициент отражения поверхности может быть рассчитан согласно следующей пошаговой процедуре (см. Примечание 1):

*Шаг 1:* Рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость поверхности Земли вблизи зон отражения поверхностью из выражения:

$$\eta = \varepsilon_r - j18\sigma/f, \quad (127)$$

где  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость и  $\sigma$  – проводимость почвы (См/м). Определите  $\varepsilon_r$  и  $\sigma$  из информации, приведенной в Рекомендации МСЭ-R P.527.

*Шаг 2:* Рассчитать угол скольжения для диапазона значений эффективного коэффициента  $k$ , полученных на шаге 3 в п. 6.1.2.3, по формуле:

$$\varphi = \frac{h_1 + h_2}{d} \left[ 1 - m(1 + b^2) \right]. \quad (128)$$

*Шаг 3:* Рассчитать коэффициент отражения поверхности для того же самого диапазона значений  $k$  по формуле:

$$\rho = \left| \frac{\sin \varphi - \sqrt{C}}{\sin \varphi + \sqrt{C}} \right|, \quad (129)$$

где:

$$C = \eta - \cos^2 \varphi \quad \text{горизонтальная поляризация,} \quad (130)$$

$$C = \frac{\eta - \cos^2 \varphi}{\eta^2} \quad \text{вертикальная поляризация.} \quad (131)$$

*Шаг 4:* Рассчитать коэффициент расхождения поверхности Земли из выражения:

$$D = \sqrt{\frac{1 - m(1 + b^2)}{1 + m(1 - 3b^2)}}. \quad (132)$$

*Шаг 5:* Рассчитать длину  $L_1$  эллипса 1-й зоны Френеля на поверхности Земли вдоль трассы из выражения:

$$L_1 = d \sqrt{1 + \frac{4fh_1h_2 \times 10^{-2}}{3d}} \left[ 1 + \frac{f(h_1 + h_2)^2 \times 10^{-2}}{3d} \right]^{-1} \quad \text{км.} \quad (133)$$

и ширину  $W_1$  этого эллипса в поперечном направлении из выражения:

$$W_1 = \sqrt{\frac{3 \times 10^{-4} d}{f}} \quad \text{км,} \quad (134)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  указываются в метрах, а  $d$  – в километрах. Допустим, что центр эллипса 1-й зоны Френеля помещен в геометрическую точку отражения в пределах очевидной поверхности отражения (см. Примечание 2).

*Шаг 6:* Если четко имеется только часть(и) эллипса 1-й зоны Френеля, которая является зеркально отражающей, определить длину  $\Delta x$  (км) этой части. Затем вычислить коэффициент зеркального отражения из выражения (см. Примечание 2):

$$R_s = \sqrt{\frac{f(h_1 + h_2)^4 (\Delta x)^2 \times 10^{-2}}{3h_1 h_2 d^3}}, \quad (135)$$

где, как и ранее,  $h_1$  и  $h_2$  указываются в метрах, а  $d$  – в километрах. В иных случаях предполагается, что  $R_s = 1$ .

*Шаг 7:* Если поверхность в пределах эллипса 1-й зоны Френеля имеет характер слегка пересеченной местности, рассчитать коэффициент неровности поверхности из выражения:

$$R_r = \sqrt{\frac{1 + (g^2 / 2)}{1 + 2,35(g^2 / 2) + 2\pi(g^2 / 2)^2}}, \quad (136)$$

где:

$$g = \frac{40\pi f \sigma_h \sin \varphi}{3}, \quad (137)$$

при этом  $\sigma_h$  (м) – стандартное отклонение высоты поверхности относительно кривой регрессии на той части профиля трассы, которая находится в пределах эллипса 1-й зоны Френеля (см. Примечание 3). В иных случаях предполагается, что  $R_r = 1$ .

*Шаг 8:* Рассчитайте эффективный коэффициент отражения поверхности для соответствующего диапазона значений эффективного коэффициента  $k$  по формуле:

$$\rho_{eff} = \rho D R_s R_r. \quad (138)$$

Уровень отраженной(ых) волны (волн) относительно уровня прямой волны можно тогда определить по методу, указанному в п. 6.1.2.5.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1.** – Установлено, что на многих трассах над сушей (особенно на более высоких частотах) будет затруднительно получить точную оценку величины эффективного коэффициента отражения поверхности вследствие наличия различных неопределенностей, таких как проводимость почвы, неровность поверхности и т. д., а также степени субъективности, необходимых в настоящее время для проведения расчетов. В таких ситуациях процедура расчетов может служить лишь приблизительным ориентиром, помогающим определить проблемы на трассе или выбрать одну трассу вместо другой, даже если такая возможность существует в первую очередь. В случае если поверхность отражения находится на земной поверхности, может оказаться желательным предположить наличие влажной земли в зонах, где такая почва преобладает в те же часы и месяцы, когда часто возникают замирания.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2.** – Уравнение (135) является наиболее точным, если ни один из краев зеркально отражающей зоны не находится далеко от точки зеркального отражения. В некоторых случаях наилучшим возможным подходом является разделение площади 1-й зоны Френеля на две области: первая область помещается на очень неровную часть поверхности, которая явно не является отражающей (из-за крутого угла местности под трассой или из-за экранирования местностью), а вторая область – на более ровную часть поверхности, частично способную отражать радиоволны, но для которой расчет коэффициента неровности поверхности производится способом, описанным в шаге 7.

В качестве руководства, если зона отражения на поверхности Земли точно охватывает площадь 1-й зоны Френеля вдоль трассы, амплитуда отраженной волны на 2,6 дБ больше амплитуды прямой волны (не учитывая влияние коэффициента расхождения,  $D$ , и избирательности антенны, что рассматривалось в п. 6.1.2.5). Эта цифра составит 6 дБ, если зона отражения точно охватывает 1-ю зону Френеля не только в продольном направлении, но также и в стороны. С другой стороны, если в зоне отражения не содержится геометрическая точка отражения, то относительная амплитуда отраженной волны будет составлять не более чем –3,4 дБ. Если зона отражения целиком расположена вне 1-й зоны Френеля, то относительная амплитуда отраженной волны будет меньше чем –11,5 дБ.

**ПРИМЕЧАНИЕ 3.** – Если профиль трассы достаточно неровный, то наилучшим возможным подходом является наложение кривой регрессии на профиль трассы вдоль длины, соответствующей длине самой 1-й зоны Френеля, что будет служить основой для определения местоположения точки отражения и последующего расчета стандартного отклонения высот профиля,  $\sigma_h$  (м), относительно этой кривой. Поскольку первоначальное

местоположение 1-й зоны Френеля неизвестно, указанная выше процедура может быть итеративным процессом. Если эллипс 1-й зоны Френеля находится на воде, то следует принять для расчетов гладкую поверхность.

#### 6.1.2.4.2 Измерения эффективного коэффициента отражения поверхности

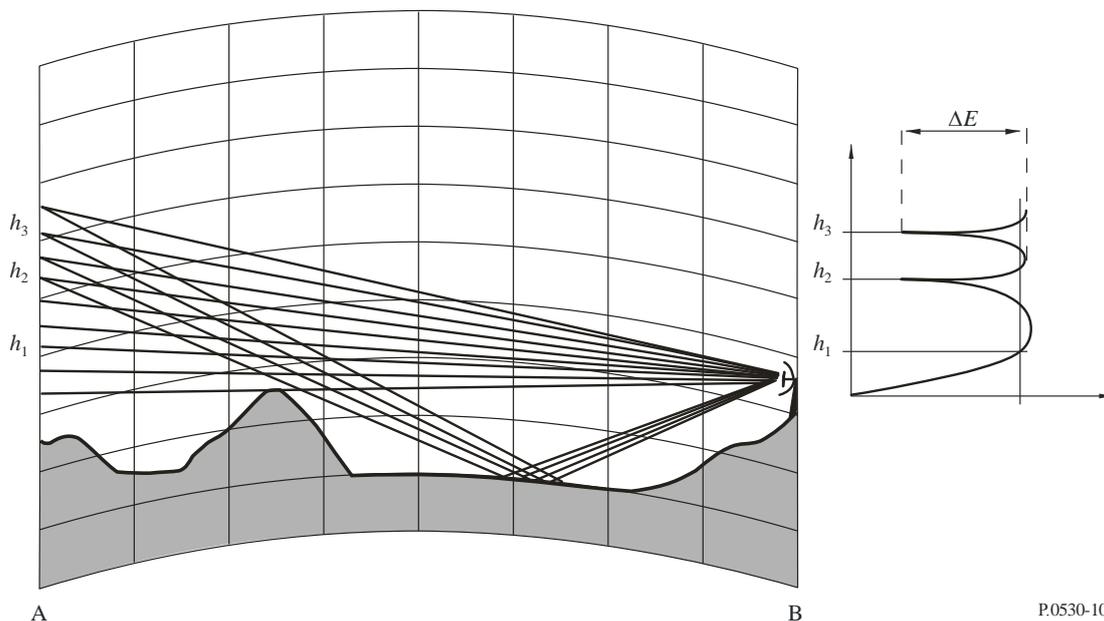
Эффективный коэффициент отражения отражающей поверхности можно измерить в нормальных условиях распространения (см. п. 8 для наилучшего времени суток; см. также Примечание 1) при помощи получения диаграммы выигрыша за счет высоты для уровня принимаемого сигнала, когда либо передающая антенна, либо приемная антенна регулируется по высоте в достаточно широком диапазоне, чтобы наблюдались как максимумы, так и минимумы этой диаграммы. Если  $\Delta E$  (дБ) – это разность между максимальным и минимальным уровнями (см. рисунок 10), то эффективный коэффициент отражения определяется по формуле:

$$\rho_{eff} = \frac{10^{\Delta E/10} + 1 - 2 \times 10^{\Delta E/20}}{10^{\Delta E/10} - 1} \quad (139)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Земная поверхность может быть более сухой в течение части суток, когда ожидаются нормальные условия распространения, чем она может быть в течение той части суток, когда ожидаются условия многолучевости. В таких ситуациях может быть желательно ввести поправку, основанную на уравнениях в п. 6.1.2.4.1 и известных различиях проводимости почвы во влажном и сухом состояниях. Материал в пп. 6.1.2.4.1 и 6.1.2.4.2 предназначен для использования лишь в качестве ориентировочного руководства.

РИСУНОК 10

Измерение  $\Delta E$  (дБ) исходя из диаграммы выигрыша за счет высоты



#### 6.1.2.5 Использование избирательности антенны

На трассах с достаточно большим наклоном или трассах с естественным значительным просветом углы между прямой волной и отраженной(ыми) от поверхности волной(ами) становятся достаточно большими, чтобы можно было использовать диаграмму излучения одной или обеих антенн для обеспечения избирательности в отношении отраженной(ых) волны (волн). Даже без этого естественного преимущества может оказаться полезным немного наклонить вверх одну или обе антенны для увеличения доступной степени избирательности. Пошаговая процедура заключается в следующем:

*Шаг 1:* Рассчитать углы между прямой волной и отраженной(ыми) от поверхности волной(ами) на станциях 1 и 2 для соответствующего диапазона значений эффективного коэффициента  $k$ , полученных в шаге 3 в п. 6.1.2.4, по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{180}{\pi} \left[ \frac{h_1}{d_1} - \frac{h_1 - h_2}{d} - \frac{d_2}{12,74k} \right] \times 10^{-3} \quad \text{градусы.} \quad (140)$$

$$\alpha_2 = \frac{180}{\pi} \left[ \frac{h_2}{d_2} - \frac{h_2 - h_1}{d} - \frac{d_1}{12,74k} \right] \times 10^{-3} \quad \text{градусы.} \quad (141)$$

*Шаг 2:* Оценить потери уровня отраженного от поверхности сигнала (сигналов) относительно прямого сигнала, вносимые избирательностью антенны, из выражения (см. Примечание 1):

$$L_a = 12 \left[ \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{дБ,} \quad (142)$$

где  $\alpha_{a1}$  и  $\alpha_{a2}$  – значения ширины луча антенн по половинной мощности.

Если отраженная(ые) от поверхности волна(ы) продвигается(ются) дальше и входит(ят) в пределы половинной ширины луча одной или обеих антенн, соответствующие антенны должны, как правило, иметь наклон вверх примерно на половину ширины луча, так чтобы ввести дополнительную избирательность антенны (см. Примечание 2). Даже если углы прихода волны, отраженной от поверхности, немного выходят за пределы половины ширины луча антенны, небольшой наклон вверх может принести определенную пользу (см. Примечание 2). Общие потери из-за избирательности антенны можно тогда рассчитать из выражения (см. Примечание 1):

$$L_a = 12 \left[ \left( \frac{\alpha_1 + \alpha_{t1}}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left( \frac{\alpha_2 + \alpha_{t2}}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{дБ,} \quad (143)$$

где  $\alpha_{t1}$  и  $\alpha_{t2}$  – углы наклона антенн вверх.

*Шаг 3:* На некоторых трассах может оказаться полезным примерно рассчитать или измерить эффективный коэффициент отражения поверхности, с тем чтобы получить общую оценку уровня отражения (отражений) от поверхности в нормальных условиях распространения. Это можно сделать с использованием информации в п. 6.1.2.4. Общие потери уровня волны (волн), отраженной(ых) от поверхности, затем определяются как:

$$L_s = L_a - 20 \log \rho_{eff} \quad \text{дБ,} \quad (144)$$

где  $L_a$  можно получить из уравнения (142) или (143), в зависимости от ситуации. Хотя эффективный коэффициент отражения поверхности может быть увеличен в условиях поверхностной многолучевости, тем не менее нет необходимости точно или полностью оценивать величину этого коэффициента, с тем чтобы рассчитать соответствующие углы наклона для антенн (см. шаг 5).

*Шаг 4:* Если одна или обе антенны имеют наклон вверх, то соответствующие потери по уровню для прямой волны в нормальных условиях распространения ( $k = 4/3$ ) определяются из формулы (см. Примечание 1):

$$L_d(k = 4/3) = 12 \left[ \left( \frac{\alpha_{t1}}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left( \frac{\alpha_{t2}}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{дБ.} \quad (145)$$

В условиях суперрефракции или субрефракции величину  $L_d(k)$  можно рассчитать из уравнения (см. Примечание 1):

$$L_d(k) = 12 \left[ \left( \frac{\alpha_{t1} - \alpha_d}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left( \frac{\alpha_{t2} - \alpha_d}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{дБ,} \quad (146)$$

где угол прихода прямого сигнала определяется приблизительно по формуле (см. Примечание 2):

$$\alpha_d = -0,0045d \left( \frac{1}{k} - \frac{3}{4} \right) \quad \text{градусы.} \quad (147)$$

*Шаг 5:* Максимальную возможную глубину замираний в нормальных условиях распространения ( $k = 4/3$ ) в результате действия ослабляющей (деструктивной) интерференции между прямым и отраженным от поверхности сигналами можно вычислить по формуле:

$$A_{max} = -20 \log \left( 10^{-L_d/20} - 10^{-L_s/20} \right) \quad \text{дБ,} \quad (148)$$

где  $L_d$  определяется из уравнения (145), а  $L_s$  – из уравнения (144) (см. Примечание 2). В условиях суперрефракции или субрефракции, в которых прямой сигнал также испытывает дополнительные потери  $0,5L_{add}$  (например, из-за расширения луча в условиях суперрефракции), а отраженный от поверхности сигнал получает усиление  $-0,5L_{add}$ , максимальная возможная глубина замираний задается по формуле:

$$A_{max} = -20 \log \left( 10^{-(L_d+0,5L_{add})/20} - 10^{-(L_s-0,5L_{add})/20} \right) \quad \text{дБ,} \quad (149)$$

где  $L_d$  определяется из уравнения (146), а  $L_s$  – из уравнения (144) (см. Примечание 2).

Углы наклона антенн могут быть оптимизированы для сведения к минимуму замираний, или амплитудных искажений из-за поверхностной многолучевости, или сочетания этих двух эффектов. Оптимизацию с целью сведения к минимуму замираний можно осуществить посредством подстановки значения  $L_{add}$  в уравнении (149) таким образом, чтобы  $L_d$  было меньше, чем  $L_s$  при  $k = \infty$  (на практике может быть выбрана большая величина  $k$ , например  $k = 1 \times 10^9$ ) примерно на 0,3 дБ, и минимизации  $A_{max}$  путем подбора углов наклона. В качестве альтернативы, значение  $\rho_{eff}$  в уравнении (144) можно установить равным значению, приближающемуся к 1,0 или более, так чтобы получить ту же самую разность примерно в 0,3 дБ (см. Примечание 2), а затем провести оптимизацию. При этом исключается ситуация, когда значение  $\rho_{eff}$  неизвестно. Запас на потери из-за замираний для такого подхода составляет величину в диапазоне 2,5–4 дБ.

Оптимизацию с целью сведения к минимуму амплитудных искажений из-за поверхностной многолучевости можно осуществить за счет еще большего увеличения углов наклона до тех пор, пока относительная избирательность антенны по отношению к отраженной от поверхности волне (волнам) не достигнет максимума. Это будет выполнено, когда различие в величине избирательности между прямой и отраженной от поверхности волнами станет максимальным. Однако для точной оптимизации углов наклона для борьбы с искажениями из-за поверхностной многолучевости должны быть доступны диаграммы направленности антенны, так как модель согласно уравнению (143) является менее точной за пределами половины ширины лепестков антенн, особенно когда достигается край главного лепестка (см. Примечание 1). Поскольку оптимизация для снижения амплитудных искажений осуществляется на фоне дополнительного запаса на потери из-за амплитудных замираний, рекомендуется, чтобы углы наклона, полученные при оптимизации в отношении замираний, были увеличены в тех же пропорциях, пока не будет достигнут максимальный запас на потери из-за замираний примерно равный 6 дБ. Хотя результирующие углы наклона менее оптимальны для борьбы с самим замиранием, увеличение глубины замирания составляет лишь доли децибела (см. Примечание 3).

Следует отметить, что оптимальная избирательность по отношению к поверхностной многолучевости за счет увеличения угла наклона антенны вверх будет также способствовать повышению избирательности в отношении атмосферной многолучевости (см. Примечание 4).

**ПРИМЕЧАНИЕ 1.** – Эта гауссова аппроксимация луча наиболее точная в пределах ширины лепестков антенн. За пределами ширины лепестков, если желательно получить более точную оценку, можно использовать реальные диаграммы направленности. Это особенно важно при приближении к краю главного лепестка.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2.** – Увеличение угла наклона антенн в направлении вверх желательно для улучшения эксплуатационных характеристик в условиях замираний из-за поверхностной многолучевости, независимо от уровня волны (волн), отраженной(ых) от поверхности в нормальных условиях распространения (т. е.  $k = 4/3$ ). Целью оптимизации для сведения к минимуму замираний является уменьшение уровня волны (волн), отраженной от поверхности, на более значительную величину по сравнению с прямой волной, тогда как снижение уровня последней достаточно лишь, для того чтобы уменьшить до минимума общую глубину замираний. Целью оптимизации для сведения к минимуму амплитудных искажений является максимальное повышение относительной разности между амплитудами прямой волны и волны (волн), отраженной(ых)

от поверхности, за счет небольшого увеличения максимальной глубины замираний. Обе эти цели могут быть достигнуты путем перемещения угла прихода волны (волн), отраженной(ых) от поверхности, в точки на диаграммах направленности антенн, где они (диаграммы) более крутые. При необходимости, снижение запаса на амплитудные замирания в нормальных условиях распространения в результате снижения избирательности антенны в направлении прямой волны при увеличении угла наклона вверх может быть компенсировано за счет увеличения размеров антенн.

Углы наклона антенны для минимизации влияния отражения(й) от поверхности в нормальных условиях распространения будут меняться в зависимости от геометрии трассы, значений ширины лепестка антенны и относительного уровня поверхностного отражения(й). Хотя чем больше ширина лепестка, тем больше требуется угол наклона для получения нужного эффекта в нормальных условиях распространения, соответствующее отношение угла наклона к ширине лепестка будет уменьшаться при увеличении ширины лепестка.

Углы наклона антенны для минимизации влияния поверхностного отражения(й) в условиях поверхностной многолучевости будут больше соответствующих углов для нормальных условий распространения, и обычно должны выбираться именно эти углы. Когда экстремальный слой, например волновод, вызывает потери уровня прямого сигнала из-за расширения пучка, возрастает вероятность того, что одновременно увеличится уровень отраженного от поверхности сигнала(ов) и в результате появятся значительные замирания из-за многолучевости. Это будет сопровождаться увеличением искажений при распространении.

С целью выбора соответствующих углов наклона для минимизации глубины замираний на основе уравнения (149), может быть выполнена имитация способом, описанным в шаге 5. (Независимо от того, выбираются ли потери  $L_d$  и  $L_s$  с целью сближения друг с другом в пределах 0,3 дБ путем изменения одной величины или другой, или обеих одновременно, по-видимому, это не самый важный фактор для получения результата.) Оптимальные углы наклона будут изменяться в зависимости от углов прихода волн, отраженных от поверхности, как определено в уравнениях (140) и (141). Большие углы наклона антенны соответствуют большему углу поверхностного отражения от этой антенны. Как отмечалось ранее, типичное снижение запаса для оптимальных углов наклона лежит в диапазоне 2,5–4 дБ. В любом случае при увеличении размеров антенн для компенсации снижения запаса на амплитудные замирания должна выполняться другая оптимизация для определения новых оптимальных углов наклона.

Как уже отмечалось, оптимизации для сведения к минимуму амплитудных искажений должно предшествовать выполнение шага по минимизации замираний и увеличению углов наклона в равных пропорциях. Использование одного или другого набора углов наклона или какого-то промежуточного варианта будет зависеть от системных соображений (см. Примечание 3).

Следует отметить, что в условиях поверхностной многолучевости происходит некоторое восстановление потерь избирательности антенны в направлении наибольшего по уровню луча (обычно прямой волны) в результате наклона антенны; это обусловлено тем фактом, что этот луч стремится иметь положительный угол прихода.

**ПРИМЕЧАНИЕ 3.** – Если увеличения размера антенны можно избежать путем оптимизации углов наклона антенны для сведения к минимуму наибольшей глубины замирания (с сопутствующим снижением запаса на амплитудное замирание порядка 2,5–4 дБ), то это могло бы быть наилучшей альтернативой. С другой стороны, если оптимизация углов наклона для сведения к минимуму амплитудных искажений улучшит в достаточной степени эксплуатационные характеристики, чтобы избежать использования разнесения, то это также могло бы стать наилучшей альтернативой. Выбор будет зависеть от качества выравнивания, используемого в системе. Третьей альтернативой был бы выбор углов наклона антенны, что приведет к снижению запаса на амплитудное замирание где-то между крайними значениями 2,5–4 дБ и примерно 6 дБ. Необходимо отметить, что при оптимизации в целях сведения к минимуму искажений имеет место лишь небольшое отклонение от оптимального условия замираний (т. е. минимальной глубины замираний).

**ПРИМЕЧАНИЕ 4.** – Как анализ путем отслеживания траектории лучей, так и широкие экспериментальные измерения углов прихода и амплитуд трех наибольших по уровню возникших в результате многолучевости волн показывают, что волна, созданная в результате атмосферной многолучевости, с более высоким углом прихода имеет тенденцию быть большей по уровню, чем вторая по уровню волна из указанных трех волн. Это означает, что пока антенны устанавливаются с углами наклона вверх, превышающими этот больший из двух углов прихода (обычно менее  $0,3^\circ$  для длин трасс в диапазоне 31–51 км), избирательность антенны в отношении атмосферной многолучевости также увеличится. Таким образом, оптимальный наклон луча антенны должен, как правило, основываться на сведении к минимуму влияния поверхностной многолучевости.

### 6.1.3 Уменьшение просвета трассы

Другой метод, который не вполне понятен или не определен количественно, как другие методы, заключается в уменьшении просвета трассы, с тем чтобы обеспечить прогнозируемую величину

потерь из-за дифракции, по крайней мере, в условиях субрефракции. Считается, что этот метод в основном работает за счет:

- уменьшения вероятности и/или серьезности потерь из-за расширения луча, которые несет прямая волна из-за влияния экстремального слоя (такого как волновод) возникающего непосредственно ниже или частично ниже полной длины трассы (метод согласно стратегии А);
- одновременного снижения вероятности того, что один и тот же слой будет усиливать поверхностные отражения (метод согласно стратегии В).

Это, в свою очередь, снижает вероятность того, что прямая волна будет объединяться деструктивно с одним или несколькими поверхностными отражениями, вызывая сильные частотно-избирательные замирания.

Еще один способ, с помощью которого, как предполагается, работает данный метод, заключается в том, что задержки между прямой волной и волной(ами), отраженной(ыми) от поверхности, уменьшаются, если экстремальный слой, вызывающий расширение луча прямой волны, лишь частично расположен ниже трассы (т. е. стратегия С). В результате это приводит к более слабым частотно-избирательным замираниям, чем в случае, если бы данный слой полностью располагался ниже трассы.

Этот метод требует нахождения компромисса между уменьшением влияния замираний из-за поверхностной многолучевости, с одной стороны, и увеличением замираний вследствие потерь на дифракцию в условиях субрефракции, с другой стороны. Правило просвета трассы в п. 2.2.2.1 имеет целью избежать потерь на дифракцию в нормальных условиях рефракции (т. е. медианный эффективный коэффициент  $k$ ), но разрешить потери на дифракцию величиной примерно 6 дБ в условиях, соответствующих  $k_e$  (99,9%). В принципе, для систем с достаточно большими запасами на амплитудные замирания могут быть допущены более значительные величины потерь на дифракцию как в нормальных условиях, так и в условиях субрефракции.

Данный метод наиболее целесообразно использовать на трассах с небольшим наклоном или при отсутствии наклона. Однако даже на трассах с определенным наклоном может оказаться полезным уменьшить просвет трассы для дополнительного снижения влияния поверхностной многолучевости.

Этот метод безопаснее применять к более низким антеннам в конфигурации с пространственным разнесением, и он рекомендуется к использованию как нечто само собой разумеющееся в методике, представленной в п. 6.2.1.

## 6.2 Методы разнесения

Методы разнесения включают пространственное, угловое и частотное разнесение. Как правило, предпочтение отдается пространственному разнесению, угловому разнесению или сочетанию того и другого метода, а не использованию частотного разнесения. Помимо того, что эти методы разнесения более эффективны с точки зрения использования частотного спектра, они еще и более совершенны по своим возможностям. Пространственное разнесение, в частности, помогает справляться с амплитудными замираниями (такими, которые вызываются потерями на расхождение лучей, а не явлениями атмосферной многолучевости с относительно короткими задержками), а также с частотно-избирательными замираниями, тогда как частотное разнесение помогает справляться только с частотно-избирательными замираниями (такими, которые вызываются явлениями поверхностной и/или атмосферной многолучевости). Частотного разнесения по мере возможности следует избегать, чтобы сохранить спектр. В тех случаях, когда используется пространственное разнесение, можно использовать также и угловое разнесение за счет разницы в углах наклона антенн. Угловое разнесение можно использовать в тех случаях, когда невозможно осуществить необходимое пространственное разнесение, или для того, чтобы уменьшить высоту антенных мачт.

Выигрыш от применения всех этих методов определяется степенью некоррелированности сигналов в ветвях системы разнесения. В случае узкополосных аналоговых систем достаточно определить степень улучшения по статистике глубины замирания на одной частоте. В случае широкополосных цифровых систем улучшение за счет разнесения будет зависеть также от статистики внутриполосных искажений.

Коэффициент улучшения за счет разнесения,  $I$ , с точки зрения глубины замирания,  $A$ , определяется как:

$$I = p(A) / p_d(A), \quad (150)$$

где  $p_d(A)$  – процент времени, когда в обеих ветвях системы разнесения глубина замирания сигнала больше  $A$ , а  $p(A)$  – соответствующий процент времени в незащищенной системе. Коэффициент улучшения за счет разнесения в случае цифровых систем определяется как отношение процентов времени превышения для заданного BER с разнесением и без него.

### 6.2.1 Разнос антенн в системах пространственного разнесения

Соответствующий разнос антенн в системах пространственного разнесения регулируется тремя факторами:

- необходимостью поддержания минимального по возможности просвета для нижней антенны (в рамках руководящих указаний в п. 2.2.2 в отношении просвета), для того чтобы свести к минимуму число случаев появления замираний из-за поверхностной многолучевости (см. п. 6.1.3);
- необходимостью получения заданного коэффициента улучшения качества за счет пространственного разнесения для трасс, проходящих над сушей (см. п. 6.2.2);
- необходимостью сведения к минимуму вероятности того, что сигнал на одной разнесенной антенне будет подвергаться замираниям из-за поверхностной многолучевости, в случаях когда замирания наблюдаются на другой антенне.

Пошаговая процедура для определения величины разноса антенн заключается в следующем:

*Шаги 1–4:* Используя шаги 1–4 из п. 6.1.2.3, определить:

- имеются ли какие-либо зоны на трассе, где могут наблюдаться значительные поверхностные зеркальные отражения; и
- требуется ли применение пространственного разнесения для борьбы с замираниями из-за поверхностной многолучевости.

(Что касается пролетов из двух ветвей с применением пассивных рефлекторов, причем один или несколько пассивных рефлекторов находятся в непосредственной близости, см. Примечание 1.) Если зоны со значительными поверхностными зеркальными отражениями отсутствуют, переходят к шагу 8.

*Шаг 5:* Для того же диапазона эффективных значений  $k$  в шаге 3 вычислить расстояния между соседними минимумами или максимумами уровня принятого сигнала (обусловленными интерференцией между прямой волной и волной из-за поверхностной многолучевости; см. рисунок 10) из выражения:

$$\theta_2 = \frac{150d}{f(h_1 - d_1^2 / 12,74k)} \quad \text{м.} \quad (151)$$

Расстояние  $\theta_1$  на станции 1 можно вычислить путем замены величин  $h_1$  и  $d_1$  в уравнении (151) величинами  $h_2$  и  $d_2$ , соответственно.

Выполнить этот шаг для каждой возможной зоны зеркального отражения.

*Шаг 6:* Вычислить значения возможного оптимального разноса антенн для того же диапазона значений  $k$  из выражений:

$$S_1 = \theta_1 / 2, 3\theta_1 / 2, 5\theta_1 / 2 \text{ и т. д.} \quad S_2 = \theta_2 / 2, 3\theta_2 / 2, 5\theta_2 / 2 \text{ и т. д.} \quad \text{м.} \quad (152)$$

Снова выполнить этот шаг для каждой возможной зоны зеркального отражения.

*Шаг 7: трассы с явными поверхностными зеркальными отражениями:* Вычислите гипотетическую высоту разнесенной антенны исходя из шагов 2–3 из п. 2.2.2.2, а также результирующий гипотетический разнос  $S'_1$  между антеннами. Сравните этот гипотетический разнос с величинами оптимального разноса, полученными в шаге 6 для соответствующего диапазона эффективных значений  $k$ .

Для трасс, в которых уровень отраженного поверхностью сигнала ожидается примерно равным уровню прямого сигнала при нормальных условиях рефракции (т. е. медианное значение  $k$  или  $k = 4/3$ ), в качестве фактического разноса должен выбираться минимальный оптимальный разнос, полученный в шаге 6 (т. е.  $S_1 = \theta_1 / 2$ ) для медианного значения  $k$  (см. Примечание 2). Это обеспечит защиту при применении пространственного разнесения для наибольшего диапазона значений  $k$ . (На низких частотах для реализации даже этого минимального оптимального разноса может потребоваться увеличение высоты верхней антенны.)

Для трасс, в которых не ожидается, что уровень отраженного поверхностью сигнала будет примерно равным уровню прямого сигнала при нормальных условиях рефракции (см. пп. 6.1.2.4 и 6.1.2.5 для того, чтобы определить, имеет ли место такой случай), возможен другой подход к проектированию. Он заключается в выборе большей величины оптимального разноса в уравнении (152) (например,  $S_1 = 3\theta_1 / 2$  или  $5\theta_1 / 2$ ) для медианного значения  $k$ , такого, который приближается по величине, но все же меньше, чем  $S'_1$ . Такая мера уменьшит вероятность появления замираний из-за поверхностной многолучевости и, кроме того, благодаря пространственному разнесению даст определенную существенную защиту от замираний, если они возникнут. Преимущество от снижения вероятности появления замираний из-за поверхностной многолучевости требуется соизмерять с недостатком использования неоптимального разноса для такого большого диапазона эффективных значений  $k$  (см. Примечание 3).

Как отмечено в п. 2.2.2.2, на некоторых протяженных трассах (обычно надводных) иногда может потребоваться применение трех разнесенных в пространстве антенн. В этом случае разнос между верхней и средней антеннами должен соответствовать наименьшему возможному оптимальному значению из уравнений (152). Высота самой низкой антенны должна основываться на правиле определения просвета в п. 2.2.2.2 (см. Примечание 4).

*Шаг 8: трассы без явных поверхностных зеркальных отражений:* Вычислить высоту разнесенной антенны согласно шагам 2–3 из п. 2.2.2.2.

Для полученной величины разноса антенн провести расчет коэффициента улучшения за счет разнесения, а также уровня сбоев с использованием методов в пп. 6.2.1 и 6.2.2. Если разнос антенн превышает предельное значение  $S = 23$  м согласно уравнению (152), провести расчет для этого предельного значения, поскольку фактическое улучшение качества при большем разнесе будет еще более значимым. При необходимости, вычислить новую высоту для верхней антенны для того, чтобы удовлетворить критериям сбоев. Во многих случаях, если просвет на трассе для нижней антенны выбран так, чтобы свести к минимуму вероятность расширения прямого луча и последующих замираний из-за поверхностной многолучевости, нет необходимости в увеличении высоты верхней антенны.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1.** – Для случая использования пролетов из двух ветвей с применением пассивных рефлекторов, причем один или несколько пассивных рефлекторов находятся в непосредственной близости, предполагается, что каждая ветвь первоначально обрабатывается как независимая линия связи для определения разноса антенн на каждом конце. Если явные поверхностные зеркальные отражения отсутствуют, то в этом случае разнос, определяемый для более протяженной ветви, должен применяться и на короткой ветви.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2.** – Эти трассы должны быть в основном трассами, на которых отраженная поверхностью волна возникает над водой и при нормальных условиях не блокируется, а угол между прямой волной и отраженной волной на обеих антеннах лежит в пределах половинной ширины лепестка антенны по уровню 3 дБ. Трассы над сушей, для которых отражение возникает на очень гладкой поверхности суши (например, равнина с влажной почвой или покрытая снегом), также могут отвечать этим требованиям.

**ПРИМЕЧАНИЕ 3.** – В данном случае считается, что преимущество от снижения вероятности появления замираний из-за поверхностной многолучевости является более важным фактором. Ожидается, что когда возникают значительные замирания из-за поверхностной многолучевости, причиной этого явления будет приземный волновод либо другой экстремальный слой с большим отрицательным градиентом рефракции, расположенный непосредственно под трассой или частично под трассой. При этих условиях, будут непригодны эффективные значения  $k$ , которые меньше медианных значений. В любом случае определяемый оптимальный разнос антенн должен основываться на медианном эффективном значении  $k$ .

**ПРИМЕЧАНИЕ 4.** – Если разнос между средней и нижней антеннами может быть выбран в соответствии с уравнениями (152), с небольшой корректировкой исходя из правила определения просвета в п. 2.2.2.2, то тогда может быть получено некоторое дополнительное улучшение качества.

### 6.2.2 Угловой разнос в системах с угловым разнесением и системах с комбинированным пространственным/угловым разнесением

При желании, в целях дальнейшего улучшения качественных показателей угловое разнесение можно сочетать с пространственным разнесением. В антеннах с пространственным разнесением вводится наклон для обеспечения этого дополнительного улучшения за счет углового разнесения. Процедура для определения углов наклона в паре антенн с пространственным разнесением или в паре расположенных рядом антенн с угловым разнесением заключается в следующем:

*Шаг 1:* Наклонить основную (верхнюю) антенну в паре антенн с пространственным разнесением (или одну из антенн в паре расположенных рядом антенн с угловым разнесением) и передающую антенну в направлении вверх на углы, соответствующие приведенным в п. 6.1.2.5 процедурам (см. Примечание 1). Это приведет к снижению запаса на амплитудные замирания в диапазоне примерно от 2,5 до 6 дБ, причем конкретная величина такого снижения зависит от того, оптимизирован ли наклон для сведения к минимуму замираний или амплитудных искажений. При необходимости, для компенсации создаваемого в результате снижения запаса на амплитудные замирания следует использовать антенну большего размера.

*Шаг 2:* Наклонить разнесенную (нижнюю) антенну в паре антенн с пространственным разнесением (или другую антенну в паре расположенных рядом антенн с угловым разнесением) в направлении вниз от местного горизонта на угол, являющийся меньшим из следующих углов:

- угол в направлении доминирующего зеркального отражения вдоль трассы (при условии  $k = \infty$ ); и
- угол, дающий потери в 3 дБ относительного опорного направления (см. Примечание 2).

Если на трассе имеются несколько мест со значительными зеркальными отражениями, то можно выбрать компромиссный угол наведения. Если явное зеркальное отражение отсутствует, может быть выбран угол в направлении предполагаемого самого сильного диффузного отражения (т. е. от поверхности и/или от растительности). В противном случае, эта антенна должна быть ориентирована в направлении линии прямой видимости в нормальных условиях или в направлении горизонта, если линия прямой видимости закрыта препятствием.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1.** – Следует отметить, что оптимальные углы наклона для передающей и приемной антенн не будут одинаковыми, если только не идентичны высоты антенн над точкой поверхностного отражения. Большой угол наклона соответствует антенне с большим углом в направлении поверхностного отражения (см. п. 6.1.2.5).

**ПРИМЕЧАНИЕ 2.** – Основная цель здесь двоякая:

- обеспечить комбинацию уровней прямого и отраженного от поверхности сигналов, которая существенно отличается от комбинации уровней на верхней антенне, с тем чтобы максимизировать эффект углового разнесения;
- обеспечить дополнительную защиту за счет разнесения в условиях сильных амплитудных замираний, вызванных расширением луча прямой волны в одном или нескольких волноводах вдоль трассы (т. е. более вероятно, что уровень надлежащим образом усиленного сигнала, отраженного от поверхности, останется в этих условиях выше порогового уровня шума).

Предельный уровень 3 дБ служит для того, чтобы избежать слишком сильного снижения уровня прямого сигнала на разнесенной антенне, в частности, когда основное зеркальное отражение расположено перед антенной.

Отметим, что результирующий угол наклона может быть положительным по отношению к линии прямой видимости при нормальных условиях, в частности, если прямой сигнал в разнесенной антенне подвержен значительным дифракционными потерям при нормальных условиях (т. е. закопанная антенна).

### 6.2.3 Разнос частот в системах с частотным разнесением

Материал в данном пункте включен для описания тех немногих ситуаций, когда частотное разнесение должно использоваться по необходимости, из-за удобства или, возможно, в сочетании с пространственным или угловым разнесением.

Соответствующий разнос частот между основным и резервным каналами в системах с частотным разнесением регулируется тремя факторами:

- имеющийся частотный план системы (см. Рекомендации МСЭ-R серии F);
- необходимость получения заданного коэффициента улучшения за счет частотного разнесения для трасс над сушей (см. п. 6.2.5.2);
- желательность сведения к минимуму вероятности того, что сигнал на одной частоте будет испытывать замирания одновременно с сигналом на другой частоте на трассах с сильным отражением.

Пошаговая процедура для определения величины разноса частот заключается в следующем:

*Шаги 1–4:* Используя шаги 1–4 из п. 6.1.2.3, определить:

- имеются ли какие-либо зоны на трассе, где могут наблюдаться значительные поверхностные зеркальные отражения; и
- требуется ли применение частотного разнесения для борьбы с замираниями из-за поверхностной многолучевости. Если зоны со значительными поверхностными зеркальными отражениями отсутствуют, переходят к шагу 8.

*Шаг 5:* Для того же диапазона эффективных значений  $k$  в шаге 3 вычислить минимальный оптимальный разнос частот основного и резервного каналов из выражения:

$$\Delta f_{min} = \frac{7,5 \times 10^4 d}{\left( h_1 - \frac{d_1^2}{12,74k} \right) \left( h_2 - \frac{d_2^2}{12,74k} \right)} \quad \text{МГц,} \quad (153)$$

где, как и ранее,  $h_1$  и  $h_2$  указываются в метрах, а  $d$ ,  $d_1$  и  $d_2$  – в километрах. Выполнить этот шаг для каждой возможной зоны зеркального отражения.

*Шаг 6:* Вычислить возможные значения оптимального разноса частот основного и резервного каналов из выражения:

$$\Delta f = \Delta f_{min}, 3\Delta f_{min} \text{ и т. д.} \quad \text{МГц.} \quad (154)$$

Снова выполнить этот шаг для каждой возможной зоны зеркального отражения.

*Шаг 7: трассы с явными поверхностными зеркальными отражениями:* Для трасс, в которых уровень основного отраженного поверхностью сигнала ожидается примерно равным уровню прямого сигнала при нормальных условиях рефракции (т. е. медианное значение  $k$  или  $k = 4/3$ ), идеальным разнесением был бы минимальный оптимальный разнос частот, полученный в шаге 5 (см. Примечание 1). Это обеспечит защиту за счет частотного разнесения для наибольшего диапазона значений  $k$ . Конечно, фактический разнос частот должен быть компромиссом между этим идеальным значением и значением, которое можно взять из имеющегося частотного плана. Любые изменения от этого идеального значения для приведения в соответствие с имеющимся частотным планом должны производиться в направлении достижения минимального значения, полученного из уравнения (153) при  $k = \infty$ . Однако следует подчеркнуть, что для получения некоторой защиты за счет частотного разнесения не требуется, чтобы фактический разнос частот был равен оптимальному значению. В качестве руководства даже для трасс с отражением может использоваться метод в п. 6.2.5.2.

Для трасс, в которых не ожидается, что уровень отраженного(ых) поверхностью сигнала(ов) будет примерно равным уровню прямого сигнала при нормальных условиях рефракции (см. пп. 6.1.2.4 и 6.1.2.5, для того чтобы определить, имеет ли место такой случай), возможен другой подход к проектированию в маловероятных примерах. Он заключается в выборе большей величины оптимального разноса в уравнении (154) для медианного значения  $k$ , если это позволяют частотный план и параметры трассы (такие, как неизбежно большая высота антенн,  $h_1$  и/или  $h_2$ , над отражающей поверхностью), или в применении разнесения с использованием встречных полос частот. Недостаток использования разноса частот, превышающего минимальное оптимальное значение заключается в том, что он не будет таким же эффективным в большом диапазоне эффективных значений  $k$  (см. Примечание 2).

Для пролетов с одним или более пассивными ретрансляторами, задающими два или более отдельных сегментов, уравнение (153) должно применяться по отдельности к отдельным сегментам, имеющим явные зеркальные отражения, а вклады отдельных сегментов должны складываться для получения полного значения  $\Delta f_{min}$ . В процессе сложения должны игнорироваться сегменты без явного зеркального отражения.

*Шаг 8: трассы без явных поверхностных зеркальных отражений:* Выполнить расчеты улучшения за счет разнесения с использованием метода в п. 6.2.5.2 и отрегулировать разнос частот для сведения к минимуму сбоев в рамках ограничений частотного плана.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Эти трассы должны быть в основном трассами, на которых отраженная поверхностью волна возникает над водой и при нормальных условиях не блокируется, а угол между прямой волной и отраженной волной на обеих антеннах лежит в пределах половинной ширины главного лепестка антенны по уровню 3 дБ. Трассы над сушей, для которых отражение возникает на очень гладкой поверхности суши (например, равнина с влажной почвой или покрытая снегом), также могут отвечать этим требованиям. В обоих случаях наименьшие оптимальные разности частот наблюдаются на коротких трассах при большой высоте антенн над отражающей поверхностью.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Для трасс с несколькими существенными отраженными поверхностью сигналами, особенно теми, уровни которых ориентировочно соизмеримы, должен быть найден определенный вид компромисса между различными прогнозируемыми идеальными разностями частот и разностями, имеющимися в частотном плане. Снова подчеркивается, что разности частот, меньшие, чем идеальный, позволят получить некоторую защиту за счет разнесения.

#### 6.2.4 Коэффициент улучшения за счет пространственного разнесения в узкополосных системах

Коэффициент улучшения за счет пространственного разнесения по вертикали для узкополосных сигналов на трассах, проходящих над сушей, можно определить по формуле:

$$I = \left[ 1 - \exp\left(-0,04 \times S^{0,87} f^{-0,12} d^{0,48} p_0^{-1,04}\right) \right] 10^{(A-V)/10}, \quad (155)$$

где:

$$V = |G_1 - G_2|, \quad (156)$$

причем:

- $A$ : глубина замирания (дБ) на незащищенной трассе;
- $p_0$ : коэффициент появления случаев многолучевости (%), полученный из уравнений (10) или (11);
- $S$ : разнесение по вертикали центров приемных антенн (м);
- $f$ : частота (ГГц);
- $d$ : длина трассы (км);
- $G_1, G_2$ : коэффициенты усиления двух антенн (дБи).

Уравнение (155) основано на данных, взятых из банка данных 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи, для следующих диапазонов переменных:  $43 \leq d \leq 240$  км,  $2 \leq f \leq 11$  ГГц и  $3 \leq S \leq 23$  м. Есть основания предполагать, что это уравнение остается корректным для коротких трасс длиной 25 км. Процент времени превышения,  $p_w$ , можно вычислить с помощью уравнения (7) или (8), в зависимости от ситуации. Уравнение (155) справедливо в диапазоне глубоких замираний, для которого корректно уравнение (7) или (8).

#### 6.2.5 Методы разнесения в цифровых системах

Разработаны методы прогнозирования вероятности сбоев и коэффициента улучшения в системах с пространственным, частотным и угловым разнесением, а также для систем, использующих сочетание пространственного и частотного разнесения. Пошаговые процедуры описаны ниже.

### 6.2.5.1 Прогнозирование сбоев при пространственном разнесении

В системах с пространственным разнесением до сих пор наиболее широко использовались сумматоры максимальной мощности. Пошаговая процедура, описываемая ниже, применяется к системам, использующим такие сумматоры. Другие сумматоры, использующие более усовершенствованный подход, основанный на оценке зависимости как минимального искажения, так и максимальной мощности от радиоканала, могут несколько улучшить характеристики.

*Шаг 1:* Рассчитать параметр многолучевой активности,  $\eta$ , по формуле, приведенной в п. 4.1, шаг 2.

*Шаг 2:* Рассчитать квадрат неселективного коэффициента корреляции,  $k_{ns}$ :

$$k_{ns}^2 = 1 - \frac{I_{ns} \times P_{ns}}{\eta}, \quad (157)$$

где коэффициент улучшения,  $I_{ns}$ , можно определить с помощью уравнения (155) для глубины замирания  $A$  (дБ), соответствующей запасу на амплитудное замирание  $F$  (дБ) (см. п. 2.3.6), а  $P_{ns}$  – из уравнения (29).

*Шаг 3:* Рассчитать квадрат селективного коэффициента корреляции,  $k_s$ :

$$k_s^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{для } r_w \leq 0,5 \\ 1 - 0,195(1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log_{10}(1 - r_w)} & \text{для } 0,5 < r_w \leq 0,9628 \\ 1 - 0,3957(1 - r_w)^{0,5136} & \text{для } r_w > 0,9628 \end{cases} \quad (158)$$

где коэффициент корреляции относительных амплитуд,  $r_w$ , определяется как:

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746(1 - k_{ns}^2)^{2,170} & \text{для } k_{ns}^2 \leq 0,26 \\ 1 - 0,6921(1 - k_{ns}^2)^{1,034} & \text{для } k_{ns}^2 > 0,26. \end{cases} \quad (159)$$

*Шаг 4:* Рассчитать вероятность неселективных сбоев,  $P_{dns}$ , по формуле:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns}}, \quad (160)$$

где  $P_{ns}$  – вероятность сбоев в незащищенной системе, определяемая с помощью уравнения (29).

*Шаг 5:* Рассчитать вероятность селективных сбоев,  $P_{ds}$ , по формуле:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta(1 - k_s^2)}, \quad (161)$$

где  $P_s$  – вероятность сбоев в незащищенной системе, определяемая с помощью уравнения (117).

*Шаг 6:* Рассчитать общую вероятность сбоев,  $P_d$ , как:

$$P_d = \left( P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3}. \quad (162)$$

### 6.2.5.2 Прогнозирование сбоев при частотном разнесении

Данный метод применим для систем 1+1. Используется та же процедура, что и для пространственного разнесения, но на шаге 2 расчет ведется по формуле:

$$I_{ns} = \frac{80}{fd} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) 10^{F/10}, \quad (163)$$

где:

- $\Delta f$ : частотное разнесение (ГГц). Если  $\Delta f > 0,5$  ГГц, используйте  $\Delta f = 0,5$ ;
- $f$ : частота несущей (ГГц);

$F$ : запас на амплитудное замирание (дБ).

Это уравнение применяется только для следующих диапазонов параметров:

$$\begin{aligned} 2 \leq f \leq 11 \text{ ГГц,} \\ 30 \leq d \leq 70 \text{ км,} \\ \Delta f / f \leq 5\%. \end{aligned}$$

### 6.2.5.3 Прогнозирование сбоев при угловом разнесении

*Шаг 1:* Определить среднюю величину угла прихода,  $\mu_0$ , по формуле:

$$\mu_0 = 2,89 \times 10^{-5} G_m d \quad \text{градусы,} \quad (164)$$

где  $G_m$  – среднее значение градиента рефракции ( $N$ -единиц/км). Если совершенно отчетливо присутствует сильное отражение от поверхности земли,  $\mu_0$  можно оценить по углу прихода отраженного луча при стандартных условиях распространения.

*Шаг 2:* Рассчитать параметр неселективного ослабления,  $r$ :

$$r = \begin{cases} 0,113 \sin \left[ 150(\delta/\Omega) + 30 \right] + 0,963 & \text{для } q > 1 \\ q & \text{для } q \leq 1, \end{cases} \quad (165)$$

где:

$$q = 2\,505 \times 0,0437^{(\delta/\Omega)} \times 0,593^{(\varepsilon/\delta)} \quad (166)$$

и

$\delta$ : угловое разнесение двух диаграмм направленности;

$\varepsilon$ : угол места более высокой антенны (положительная величина по отношению к поверхности земли);

$\Omega$ : ширина луча на уровне половинной мощности диаграмм направленности антенн.

*Шаг 3:* Рассчитать параметр неселективной корреляции,  $Q_0$ :

$$Q_0 = r \left( 0,9399^{\mu_0} \times 10^{-24,58 \mu_0^2} \right) \left[ 2,469^{1,879(\delta/\Omega)} \times 3,615^{[(\delta/\Omega)^{1,978} (\varepsilon/\delta)]} \times 4,601^{[(\delta/\Omega)^{2,152} (\varepsilon/\delta)^2]} \right]. \quad (167)$$

*Шаг 4:* Рассчитать параметр многолучевой активности,  $\eta$ , по формуле, приведенной в шаге 2 п. 4.1.

*Шаг 5:* Рассчитать вероятность неселективных сбоев по формуле:

$$P_{dns} = \eta Q_0 \times 10^{-F/6,6}. \quad (168)$$

*Шаг 6:* Рассчитать квадрат селективного коэффициента корреляции,  $k_s$ , по формуле:

$$k_s^2 = 1 - \left( 0,0763 \times 0,694^{\mu_0} \times 10^{23,3 \mu_0^2} \right) \delta \left( 0,211 - 0,188 \mu_0 - 0,638 \mu_0^2 \right)^\Omega. \quad (169)$$

*Шаг 7:* Рассчитать вероятность селективных сбоев,  $P_{ds}$ , по формуле:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)}, \quad (170)$$

где  $P_s$  – вероятность сбоев в незащищенной системе (см. шаг 3 в п. 5.1).

*Шаг 8:* И наконец, рассчитать общую вероятность сбоев,  $P_d$ , как:

$$P_d = \left( P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3}. \quad (171)$$

#### 6.2.5.4 Прогнозирование сбоев в условиях пространственного и частотного разнесения (два приемника)

*Шаг 1:* Неселективный коэффициент корреляции,  $k_{ns}$ , определяется как:

$$k_{ns} = k_{ns,s} k_{ns,f}, \quad (172)$$

где  $k_{ns,s}$  и  $k_{ns,f}$  – неселективные коэффициенты корреляции, рассчитанные для пространственного разнесения (см. п. 6.2.5.1) и частотного разнесения (см. п. 6.2.5.2), соответственно.

Остальные шаги такие же, как и в случае пространственного разнесения.

#### 6.2.5.5 Прогнозирование сбоев в условиях пространственного и частотного разнесения (четыре приемника)

*Шаг 1:* Рассчитать  $\eta$ , как на шаге 2 в п. 4.1.

*Шаг 2:* Рассчитать параметр разнесения,  $m_{ns}$ , следующим образом:

$$m_{ns} = \eta^3 (1 - k_{ns,s}^2) (1 - k_{ns,f}^2), \quad (173)$$

где  $k_{ns,s}$  и  $k_{ns,f}$  рассчитываются, как в п. 6.2.5.4.

*Шаг 3:* Рассчитать вероятность неселективных сбоев,  $P_{dns}$ , по формуле:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}^4}{m_{ns}}, \quad (174)$$

где  $P_{ns}$  определяется с помощью уравнения (29).

*Шаг 4:* Рассчитать квадрат эквивалентного неселективного коэффициента корреляции,  $k_{ns}$ :

$$k_{ns}^2 = 1 - \sqrt{\eta} (1 - k_{ns,s}^2) (1 - k_{ns,f}^2). \quad (175)$$

*Шаг 5:* Рассчитать эквивалентный селективный коэффициент корреляции,  $k_s$ , используя ту же процедуру, что и для пространственного разнесения (шаг 3).

*Шаг 6:* Рассчитать вероятность селективных сбоев,  $P_{ds}$ , по формуле:

$$P_{ds} = \left[ \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \right]^2, \quad (176)$$

где  $P_s$  – вероятность сбоев в незащищенной системе, определяемая с помощью уравнения (117).

*Шаг 7:* Рассчитать общую вероятность сбоев,  $P_d$ , с помощью уравнения (162).

## 7 Прогнозирование вероятности полного сбоя

Рассчитать вероятность полного сбоя в условиях ясного неба с помощью соотношения:

$$P_t = \begin{cases} P_{ns} + P_s + P_{XP} & \text{если используется разнесение,} \\ P_d + P_{XP} & \end{cases} \quad (177)$$

полученного с помощью методов, описанных в пп. 2.3.6, 4.1, 5.1, 6.2.4 и 6.2.5.

За вероятность полного сбоя, вызванного дождем, принимается большая из величин,  $P_{rain}$  и  $P_{XPR}$ , полученных с помощью методов, представленных в пп. 2.4.7 и 4.2.2.

Методы прогнозирования сбоев для цифровых радиосистем были разработаны на основе определения сбоя как значения BER, превышающего заданный порог (например,  $1 \times 10^{-3}$ ), с тем чтобы удовлетворялись требования, изложенные в Рекомендации МСЭ-T G.821. Сбои подразделяются на те, которые связаны с характеристиками ошибок, и те, что влияют на готовность (см. Рекомендации МСЭ-R F.594, МСЭ-R F.634, МСЭ-R F.695, МСЭ-R F.696, МСЭ-R F.697, МСЭ-R F.1092,

МСЭ-R F.1189 и МСЭ-R F.557). Сбои в условиях ясного неба преимущественно относятся к тем, что влияют на характеристики системы, а сбои из-за осадков – к тем, что оказывают влияние на готовность системы. Однако существует вероятность, что на готовность могут оказать воздействие явления, характерные для ясного неба, а на характеристики системы – осадки.

## **8 Аспекты распространения радиоволн при введении системы в эксплуатацию**

При проведении испытаний в процессе ввода системы в эксплуатацию в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R F.1330 желательно избегать времени года и времени суток, когда наиболее вероятно возникновение многолучевого распространения радиоволн.

Исследования, проведенные в восточноевропейских странах с умеренным климатом, показывают, что явления многолучевого распространения с наибольшей вероятностью возникают зимой и в течение двух предыдущих месяцев. Что касается испытаний, которые должны проводиться летом, период в течение дня, когда такие явления наблюдались реже всего, приходился на 10 час. 00 мин. – 14 час. 00 мин. местного времени.

Исследования, проведенные в западноевропейских странах с приморским климатом на широте  $60^\circ$  с. ш., показывают, что явления многолучевого распространения реже всего возникают в период 13 час. 00 мин. – 20 час. 00 мин. местного времени независимо от времени года. Зимний период был менее всего подвержен замираниям, вызванным многолучевым распространением; за этим период следуют осень и весна.

## **Прилагаемый документ 1 к Приложению 1**

### **Метод определения геоклиматического коэффициента, $K$ , по данным измерений замираний на трассах, проходящих над сушей**

*Шаг 1:* Получить распределение замираний по огибающей для наихудшего календарного месяца для каждого года эксплуатации, используя в качестве эталона долгосрочное медианное значение. Усреднить эти данные для получения интегральной функции распределения замираний для среднего наихудшего месяца и построить график этого распределения в полулогарифмических координатах.

*Шаг 2:* На графике найти глубину замирания,  $A_1$ , выше которого интегральная функция распределения становится приблизительно линейной, и определить соответствующий процент времени,  $p_1$ . Эта линейная часть представляет собой хвост распределения для замираний большой глубины, наклон которого может меняться примерно на 3 или 4 дБ/декаду относительно среднего "рэлеевского" значения наклона, равного 10 дБ/декаду, причем величина этого изменения зависит от числа лет сбора данных, по которым получено усредненное распределение.

*Шаг 3:* Вычислить наклон трассы  $|\epsilon_p|$ , пользуясь уравнением (6).

*Шаг 4:* В уравнение (7) или (8), в зависимости от ситуации, подставить координаты  $(p_1, A_1)$  "первой точки хвоста", а также значения  $d, f, |\epsilon_p|$  и вычислить геоклиматический коэффициент,  $K$ .

*Шаг 5:* Если имеются данные для нескольких трасс в регионе с похожим климатом и рельефом местности или данные для одной трассы на нескольких частотах и т. д., то следует определить средний геоклиматический коэффициент посредством усреднения значений  $\log K$ .