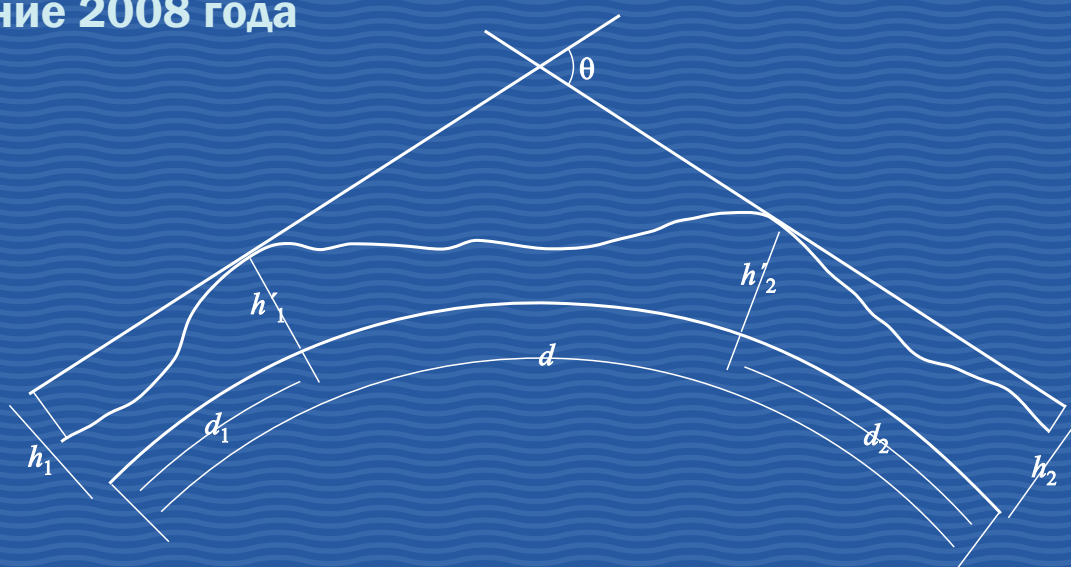


# Справочник

## ДАННЫЕ О РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПУНКТА С ПУНКТОМ

Издание 2008 года



## СЕКТОР РАДИОСВЯЗИ МСЭ

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.

### **Справки по вопросам радиосвязи**

*Обращайтесь по адресу:*

ITU  
Radiocommunication Bureau  
Place des Nations  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Тел.:	+41 22 730 5800
Факс:	+41 22 730 5785
Эл. почта:	brmail@itu.int
Веб-сайт:	www.itu.int/itu-r

### **Размещение заказов на публикации МСЭ**

*Обращаем внимание, что заказы не принимаются по телефону. Их следует направлять по факсу или электронной почте.*

ITU  
Sales and Marketing Division  
Place des Nations  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Факс:	+41 22 730 5194
Эл. почта:	sales@itu.int

**Электронный магазин МСЭ:**                    **[www.itu.int/publications](http://www.itu.int/publications)**

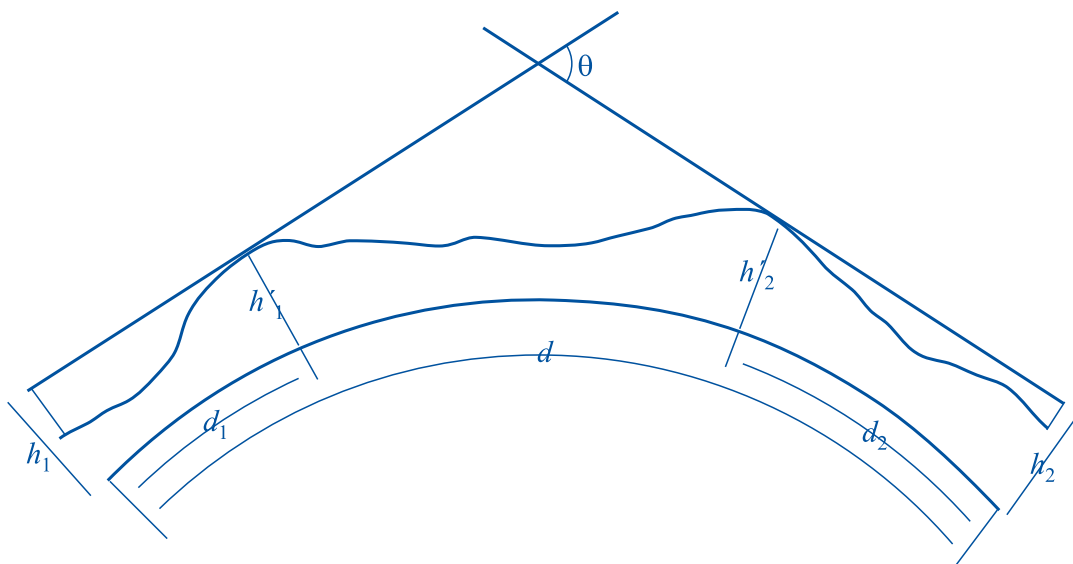
© ITU 2009

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.

# Справочник

## ДАННЫЕ О РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАЗЕМНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПУНКТА С ПУНКТОМ

Издание 2008 года





## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Наземные радиолинии составляют важную часть инфраструктуры электросвязи в большинстве стран мира. Правильное определение основных характеристик, связанных с влиянием распространения радиоволн, имеет решающее значение для эффективности работы сети и качества поддерживаемых услуг, а также существенной экономической выгоды наиболее эффективного использования электромагнитного спектра.

Этот Справочник содержит справочную информацию, научные ссылки и справочные материалы о влиянии распространения радиоволн для линий прямой видимости, тропосферных линий и линий за горизонтом связи, а также линий связи оптических систем в свободном пространстве. Он предназначен для использования в сочетании с Рекомендациями, которые ведутся и поддерживаются 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи, для помощи в проектировании наземных линий связи пункта с пунктом.

Бертрам Арбессер-Растбург

Председатель, 3-я Исследовательская  
комиссия по радиосвязи



## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	iii
ВВЕДЕНИЕ.....	1
БЛАГОДАРНОСТИ.....	2
<b>ЧАСТЬ 1 – ЛИНИИ СВЯЗИ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ.....</b>	<b>3</b>
1 ВВЕДЕНИЕ.....	3
2 ТИПОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ.....	3
3 ОСНОВНЫЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ.....	4
3.1 Потери в свободном пространстве.....	4
3.2 Ослабление в атмосферных газах.....	4
3.3 Дифракционные замирания и просвет трассы.....	5
3.3.1 Основа метода прогнозирования дифракционных потерь.....	5
3.3.2 Основа процедур определения просвета трассы.....	5
3.4 Сцинтилляционные замирания.....	7
3.5 Обзор механизмов распространения радиоволн, связанных с многолучевыми замираниями.....	7
4 ОСЛАБЛЕНИЕ В ОСАДКАХ И ДРУГИХ ЧАСТИЦАХ АТМОСФЕРЫ.....	8
4.1 Ослабление в осадках.....	8
4.1.1 Основа метода прогнозирования ослабления в дожде.....	8
4.1.2 Удельное ослабление.....	9
4.1.3 Эффективная длина трассы.....	10
4.1.4 Примеры применений.....	10
4.1.5 Прогнозирование сочетания дождя и мокрого снега.....	11
4.1.6 Долгосрочное масштабирование частоты и поляризации статистических данных о ослаблении в дожде.....	14
4.1.6.1 Масштабирование для одной частоты.....	14
4.1.6.2 Поляризационное масштабирование.....	14
4.1.7 Статистические данные длительности и коэффициента замирания, вызванного дождем.....	14
4.1.8 Сезонные колебания – худший месяц.....	15
4.1.9 Обсуждение оценки модели (испытание).....	16
4.1.10 Пример вычислений.....	16
4.2 Спаренные и сходящиеся трассы.....	17
4.2.1 Коррелированные замирания на транзитных трассах.....	17
4.2.2 Сходящиеся трассы.....	18
4.3 Трассы с пассивными ретрансляторами.....	19
5 МНОГОЛУЧЕВОЕ ЗАМИРАНИЕ И УЛУЧШЕНИЕ НА ЕДИНИЧНОЙ ЧАСТОТЕ.....	19
5.1 Прогнозирование замирания/улучшение распространения.....	19
5.1.1 Основы и точность Методов 1 и 2.....	19
5.1.1.1 Полное распределение, полученное с хвоста.....	19

	<i>Стр.</i>	
5.1.1.2	Определение хвоста распределения многолучевых замираний.....	20
5.1.1.3	Точность метода для хвоста распределения глубоких замираний.....	22
5.1.2	Основа и точность метода для неглубоких замираний.....	23
5.1.3	Основа и точность метода для диапазона улучшения.....	23
5.1.4	Примеры применений.....	24
5.2	Статистика количества и длительности замираний.....	25
5.2.1	Процедуры оценки.....	25
5.2.2	Экспериментальная основа процедур оценки.....	26
5.3	Скорость изменения уровня сигнала.....	26
5.4	Короткие трассы.....	26
5.5	Короткие периоды времени.....	27
5.6	Спаренные линии.....	28
6	ИСКАЖЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ.....	28
6.1	Модели многолучевого распространения.....	28
6.1.1	Гипотетические лучевые модели.....	29
6.1.2	Полиномиальные модели.....	29
6.1.3	Параметрические модели.....	29
6.2	Расчет качественных показателей.....	29
6.2.1	Метод кривой сигнатуры.....	30
6.2.2	Методы запасов на замирания.....	32
6.2.3	Метод, использующий статистические данные линейной амплитудной дисперсии (LAD).....	32
7	УМЕНЬШЕНИЕ КРОССПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ.....	34
7.1	Модель канала.....	34
7.1.1	Номинальное принимаемое поле.....	36
7.1.2	XPD при распространении (однолучевой подход).....	36
7.1.2.1	Условия ясного неба.....	37
7.1.2.2	Условия дождя.....	37
7.1.3	XPD вследствие многолучевого распространения (2 луча).....	38
7.1.4	Зависимость от ослабления по основной поляризации.....	38
7.2	Статистические данные для прогнозирования XPD в условиях ясного неба ...	39
7.2.1	Описание Метода Q.....	40
7.2.2	Примеры применений.....	41
7.3	Статистические данные для прогнозирования XPD в условиях атмосферных осадков.....	42
7.3.1	Основа методов прогнозирования XPD в условиях атмосферных осадков.....	42
7.3.2	Примеры применений.....	43
7.4	Относительное воздействие ухудшения XPD в условиях ясного неба и дождя.....	43
7.5	Явление кроссполяризации, обусловленное песчаными и пылевыми бурями.	44



8	СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ .....	44
8.1	Стратегии и методы без разнесения.....	44
8.1.1	Увеличение наклона трассы .....	45
8.1.2	Уменьшение влияния отражений от поверхности.....	45
8.1.2.1	Экранирование точки отражения .....	46
8.1.2.2	Перенос точки отражения на поверхность с худшими коэффициентами отражения .....	46
8.1.2.3	Оптимальный выбор высоты антенн .....	46
8.1.2.4	Выбор вертикальной поляризации.....	46
8.1.2.5	Использование избирательности антенны .....	46
8.1.3	Уменьшение просвета трассы.....	47
8.2	Методы разнесения.....	47
8.2.1	Пространственное разнесение .....	48
8.2.2	Разнос антенн в системах пространственного разнесения .....	48
8.2.3	Угловое разнесение в системах с угловым разнесением и системах с комбинированным пространственно/угловым разнесением .....	48
8.2.4	Улучшение за счет пространственного разнесения в узкополосных системах .....	50
8.2.5	Частотное разнесение .....	50
8.2.5.1	Коэффициент улучшения за счет пространственного разнесения в узкополосных системах 1 + 1 .....	50
8.2.5.2	Коэффициент улучшения за счет пространственного разнесения в узкополосных переключающихся многоканальных системах (n + 1).....	51
8.2.5.3	Примеры применений .....	51
8.2.6	Коэффициент улучшения за счет поляризационного разнесения в широкополосных системах .....	52
8.2.7	Относительные достоинства методов разнесения и их комбинаций.....	53
8.3	Методы разнесения для облегчения уменьшения в XPD .....	53
	СПРАВОЧНЫЕ ДОКУМЕНТЫ.....	54
	<b>ЧАСТЬ 2 – ТРОПОСФЕРНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ .....</b>	<b>61</b>
1	ВВЕДЕНИЕ.....	61
2	ТИПОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ .....	61
3	ОСНОВНАЯ ТЕОРИЯ.....	61
3.1	Дифракция.....	62
3.1.1	Дифракция над гладкой сферической Землей.....	62
3.1.2	Дифракция над изолированными препятствиями .....	63
3.1.3	Дифракция над множественными препятствиями.....	63
3.1.4	Дифракция над пересеченной местностью.....	63
3.2	Тропосферное рассеяние.....	64
4	ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ПЕРЕДАЧИ .....	66
4.1	Потери из-за дифракции.....	67
4.1.1	Дифракция над сферической земной поверхностью.....	67
4.1.2	Дифракция у клиновидного препятствия .....	68
4.1.3	Отдельное округлое препятствие .....	68
4.1.4	Двойное клиновидное препятствие.....	69

	<i>Стр.</i>	
4.1.5	Несколько отдельных препятствий.....	69
4.1.6	Примеры применений .....	69
4.1.6.1	Трасса над сферической Землей.....	69
4.1.6.2	Дифракция на отдельном препятствии.....	70
4.1.6.3	Дифракция на нескольких отдельных препятствиях.....	71
4.2	Потери передачи из-за тропосферного рассеяния.....	73
4.2.1	Коэффициент усиления антенны на трассе.....	74
4.2.2	Пример применения .....	75
4.2.3	Результаты испытаний .....	77
4.2.4	Комбинированные потери их изменчивость.....	77
4.2.4.1	Влияние частоты.....	77
4.2.4.2	Долгосрочные и кратковременные изменения потерь передачи .....	77
4.2.4.3	Сезонные и внутрисуточные изменения .....	78
5	ИСКАЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ ВО ВРЕМЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ .....	79
6	МЕТОДЫ РАЗНЕСЕНИЯ .....	80
6.1	Пространственное разнесение .....	80
6.2	Частотное разнесение .....	81
6.3	Угловое разнесение .....	81
6.4	Разнесение по поляризации .....	82
6.5	Разнесение по времени.....	82
6.6	Комбинированные методы.....	82
6.7	Выигрыш за счет разнесения.....	82
	СПРАВОЧНЫЕ ДОКУМЕНТЫ.....	84
 <b>ЧАСТЬ 3 – ЛИНИИ СВЯЗИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ .</b>		 87
1	ВВЕДЕНИЕ.....	87
2	ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНИЙ FSO.....	87
3	ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ .....	88
4	АТМОСФЕРНЫЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ИЗ-ЗА ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ .....	88
4.1	Ослабление в условиях ясного неба.....	89
4.2	Чрезмерное ослабление.....	89
4.2.1	Рассеяние света на шаровых частицах (оценка ослабления в тумане).....	91
4.2.2	Ослабление в дожде.....	92
4.2.3	Ослабление в снеге .....	93
5	ЭФФЕКТЫ РАССЕЯНИЯ.....	94
6	ОСЛАБЛЕНИЕ ИЗ-ЗА ОКРУЖАЮЩЕГО СВЕТА .....	95
7	ДРУГИЕ ПРОБЛЕМЫ.....	96
8	ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ.....	97
	СПРАВОЧНЫЕ ДОКУМЕНТЫ.....	99

## ВВЕДЕНИЕ

Справочник МСЭ-R – Данные о распространении радиоволн для проектирования наземных линий связи пункта с пунктом содержит справочные материалы и дополнительную информацию о влиянии распространения радиоволн, а также служит дополнительным материалом и руководством к Рекомендациям, разработанным 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи, в помощь проектированию наземных систем связи. Соответствующие Рекомендации МСЭ-R, перечисленные ниже, содержат методы прогноза ухудшения и инженерные рекомендации по распространению радиоволн для наземных систем прямой видимости (LoS) и тропосферных радиорелейных систем.

Данный Справочник является одним из шести Справочников, подготовленных 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи и предназначен для использования в сочетании с опубликованными Рекомендациями МСЭ-R серии Р для облегчения пользователю применения этих Рекомендаций. Ниже приводятся другие Справочники 3-й Исследовательской комиссии МСЭ, охватывающие вопросы распространения над земной поверхностью, радиометеорологию, системы подвижной связи Земля-космос и сухопутной подвижной связи, а именно:

- Кривые распространения радиоволн над поверхностью Земли.
- Радиометеорология.
- Данные о распространении радиоволн для прогнозирования трасс связи Земля-космос.
- Ионосфера и ее влияние на распространение радиоволн.
- Наземное сухопутное подвижное распространение радиоволн в ОВЧ/УВЧ диапазонах.

Пользователям Рекомендаций МСЭ-R по конкретным вопросам рекомендуется обращаться к соответствующему справочнику.

Справочник по наземным линиям связи пункта с пунктом предназначен для использования с Рекомендациями МСЭ-R Серии Р для систем прямой видимости, тропосферных радиорелейных систем и линий оптических систем связи в свободном пространстве. Ключевыми Рекомендациями МСЭ-R, указанными в настоящем Справочнике, являются:

- Рекомендация МСЭ-R P.530-12: Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования наземных систем связи, работающих в пределах прямой видимости.
- Рекомендация МСЭ-R P.617-1: Методы прогнозирования распространения радиоволн и данные, необходимые для проектирования тропосферных радиорелейных систем.

Данный Справочник МСЭ-R связан с вышеуказанными Рекомендациями и использует ту же терминологию, нотацию, номера формул и т. д. Дублирование данных о распространения из этих Рекомендаций специально сведено к минимуму, и сами методы прогнозирования находятся в этих Рекомендациях. Разумеется, необходимо использовать последнюю версию Рекомендаций для всех расчетов системы.

Правильное применение этих Рекомендаций МСЭ-R для наземных систем требует ввода радиометеорологических и других данных из дополнительных Рекомендаций МСЭ-R. Другими Рекомендациями МСЭ-R, упомянутыми в настоящем Справочнике, являются:

- Рекомендация МСЭ -R P.310-9: Определения терминов, относящихся к распространению радиоволн в неионизированной среде.
- Рекомендация МСЭ -R P.311-12: Сбор, представление и анализ данных при исследовании тропосферного распространения.
- Рекомендация МСЭ-R P.525-2: Расчет ослабления в свободном пространстве.
- Рекомендация МСЭ-R P.526-10: Распространение радиоволн за счет дифракции.
- Рекомендация МСЭ-R P.453-9: Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции.
- Рекомендация МСЭ-R P.676-7: Ослабление в атмосферных газах.
- Рекомендация МСЭ-R P.834-6: Влияние тропосферной рефракции на распространение радиоволн.
- Рекомендация МСЭ-R P.837-5: Характеристики осадков, используемые для моделирования распространения радиоволн.
- Рекомендация МСЭ-R P.310-9: Определения терминов, относящихся к распространению радиоволн в неионизированной среде.
- Рекомендация МСЭ-R P.838-3: Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.
- Рекомендация МСЭ-R P.1814: Методы прогнозирования, требуемые для разработки наземных оптических линий для связи в свободном пространстве.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Справочник был составлен Рабочей группой 3М МСЭ-R и основан на ряде вкладов и материалов открытого источника, в частности, Заключительном отчете по проекту COST 235. Свой вклад, в частности, внесли следующие лица:

АРАПОГЛУ Пантелис-Даниэль (ARAPOGLOU, Pantelis-Daniel)

АССИС МАУРО (ASSIS, Mauro)

МИРАНДА Эразмус Куто Бразил де (MIRANDA, Erasmus Couto Brazil de)

ОЛСЕН Родерик Л. (OLSEN, Roderic L.)

ОРДАНО Лучиано (ORDANO, Luciano)

САТО Акио (SATO, Akio)

СИЛВА МЕЛЛО Луиз А.Р. да (SILVA MELLO, Luiz A.R. da)

СИЗУН Эрве (SIZUN, Herve)

ТАНЕМ Торбьорн (TANEM, Torbjørn)

ТЬЕЛЬТА Терье (TJELTA, Terje)

ВЕНТУРАС Спиридон (VENTOURAS, Spiridon)

ДЗАФФАРОНИ Маурицио (ZAFFARONI, Maurizio)

ЦЗЯНЬ Мингао (ZHANG, Mingao).

*Редакторы Справочника:* Luiz A.R. da Silva Mello и Terje Tjelta.

*Редактор Части 1 – Линии связи прямой видимости:* Roderic L. Olsen.

*Редактор Части 2 – Тропосферные линии:* Mauro Assis.

*Редактор Части 3 – Линии оптических систем связи в свободном пространстве:* Spiridon Ventouras.

## ЧАСТЬ 1

### ЛИНИИ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ

#### 1 Введение

Эта Часть Справочника МСЭ-R содержит руководство по вопросам, связанным с распространением радиоволн, для целей проектирования и эксплуатации радиорелейных систем прямой видимости. Для получения более подробной информации о системных вопросах, таких как принципы, проектирование и эксплуатация радиорелейных систем прямой видимости должен быть использован Справочник по цифровым радиорелейным системам МСЭ-R.

Сначала приводится краткий обзор типичных применений таких систем радиосвязи. В следующих разделах представлена справочная информация о различных методах прогнозирования для линий прямой видимости (LoS), как приведено в соответствующей Рекомендации МСЭ-R P.530. Как и в последней Рекомендации, информация систематизирована в соответствии с влиянием распространения, которое необходимо принять во внимание.

Кроме того, Справочник содержит отобранные методы прогнозирования, альтернативные методам, указанным в Рекомендации МСЭ-R P.530, для прогнозирования многолучевых замираний на одной частоте и для распространения, вызывающего искажения.

#### 2 Типовые применения

Радиорелейные системы прямой видимости существуют в течение нескольких десятилетий как для передачи сигнала в сетях электросвязи, так и для распределения в вещательных системах. Первые радиорелейные системы были аналоговыми, в них несущая частота модулировалась по частоте. Первые цифровые радиорелейные системы плездохронной цифровой иерархии (ПЦИ), появившиеся около 1970 года, работали на скоростях от 1,5 Мбит/с до 140 Мбит/с. В синхронной цифровой иерархии (СЦИ), цифровые радиорелейные системы прямой видимости могут быть использованы как интегрированная часть сети вместе с оптическим волокном и другим оборудованием передачи. Такие радиорелейные системы имеют емкость от 52 до 622 Мбит/с для каждого радиоканала. В последние годы появились цифровые радиорелейные системы с возможностью передачи на скоростях Гбит/с.

Цифровые радиорелейные системы прямой видимости могут функционировать в диапазоне частот от 1 ГГц до 90 ГГц. В Рекомендациях МСЭ-R, относящихся к 5-ой Исследовательской комиссии по радиосвязи, приводятся конкретные частоты каналов и полосы для различных радиорелейных систем.

Некоторые новые условия распространения были введены широкой полосой пропускания цифровой передачи для решения проблем распространения, связанных с замираниями сигнала, ослаблением в дожде, дифракцией. Искажение вследствие частотной зависимости амплитуды и групповой задержки становится значительным при многолучевом распространении условиях ясного неба. Для смягчения влияния многолучевых замираний и искажений могут использоваться адаптивные эквалайзеры наряду с различными методами разнесения, например, частотного, пространственного, углового разнесения или разнесения по поляризации.

Из-за потерь распространения, ограничения мощности передатчика и ограничения усиления антенны полезная длина трассы ограничена. Максимальная длина трассы на частотах выше примерно 10 ГГц зависит, главным образом, от дождя, влияние которого растет с ростом частоты, но также зависит от профиля трассы и качественных показателей. Для более низких частот (< примерно 10 ГГц), последствия дождя менее значительны, нежели искажения сигнала из-за многолучевых замираний. Так, например, на частотах ниже 11 ГГц типичная длина трассы составляет примерно от 40 до 60 км, на частотах между 13 и 15 ГГц примерно от 20 до 30 км; и для 18 ГГц примерно 15 км, однако, изменения для конкретной местности могут быть весьма значительны.

Обычно для передачи используется только одна линейная поляризация – горизонтальная или вертикальная. Для увеличения пропускной способности канала, например, до 622 Мбит/с или больше, без увеличения ширины полосы пропускания, для передачи независимого канала на той частоте по той же трассе может использоваться ортогональная поляризация. Однако в этом случае для уменьшения влияния соседнего канала должны применяться подавители кроссполаризационных помех (ХРПС).

Основными применениями для будущих цифровых радиорелейных систем прямой видимости являются транспортные системы из пункта в пункт с высокой пропускной способностью и широкополосные городские сети с использованием беспроводного доступа. Эти и другие существующие применения используют преимущества надежности, пропускной способности и скорости цифровых систем радиосвязи при постоянном снижении затрат и коротком времени выхода на рынок.

### 3 Основные эффекты распространения радиоволн

Механизмы распространения, которые должны быть приняты во внимание при разработке наземных линий LoS, можно разделить на две группы в зависимости от того, оказывают ли они влияние на перерывы в работе, по крайней мере, для типичных приложений, рассмотренных в п. 2. Многолучевые замирания являются основным механизмом, вызывающим перерывы в работе, на частотах ниже примерно 10 ГГц для трасс протяженностью более нескольких километров. Ослабление в осадках является основным механизмом, вызывающим перерывы в работе, на частотах выше 10 ГГц. В силу своей важности, методы прогнозирования статистики замираний и ослабления вследствие этих механизмов и методы их снижения рассматриваются отдельно в следующих разделах.

Основная задача настоящей главы заключается в том, чтобы рассмотреть другие основополагающие эффекты распространения радиоволн, которые должны быть приняты во внимание при проектировании систем, но которые не оказывают существенного влияния на перерывы в работе. К ним относятся потери в свободном пространстве, ослабление в результате атмосферного поглощения, дифракционные потери, потери из-за развязки антенны и сцинтилляционных замираний. Все это рассматривается в п. с 3.1 по п. 3.5. Однако поскольку явления, связанные с многолучевыми замираниями, учитываются в нескольких разделах, рассматривающих воздействие и подавление многолучевых замираний, эти эффекты кратко обобщены в п. 3.6. Более подробная информация о физических явлениях, связанных со всеми видами влияния распространения, представлена в соответствующем Справочнике 3-й Исследовательской комиссии МСЭ-R – Радиометереология.

#### 3.1 Потери в свободном пространстве

Потери в свободном пространстве в первую очередь вызываются только расходимостью луча, т. е. с тем, что при увеличении расстояния от источника энергии сигнала распространяется по областям большего размера. Эти потери можно определить как ослабление сигнала, которое наблюдалось бы, если бы влияние всех процессов поглощения, дифракции, препятствий, преломления, рассеяния и отражения было удалено настолько, чтобы не оказать никакого воздействия на распространение радиоволн. В Рекомендации МСЭ-R P.525 приведены уравнения, которые должны использоваться при расчете потерь в свободном пространстве:

$$L_{bf} = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где:

- $L_{bf}$ : потери в свободном пространстве,
- $d$ : длина трассы,
- $\lambda$ : длина волны в тех же единицах, что и  $d$ .

Решая уравнение (дБ) и используя частоту вместо длины волны, получим:

$$L_{bf} \text{ (дБ)} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d, \quad (2)$$

где:

- $L_{bf}$ : основные потери передачи в свободном пространстве (дБ),
- $d$ : длина трассы (км),
- $f$ : частота (МГц).

#### 3.2 Ослабление в атмосферных газах

Некоторое ослабление за счет поглощения в кислороде и водяных парах присутствует всегда, и должно учитываться при расчете общих потерь при распространении радиоволн на частотах выше примерно 10 ГГц. Ослабление на трассе длиной  $d$  (км) определяется по формуле:

$$A_a = \gamma_a d \quad \text{дБ}. \quad (3)$$

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

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – На трассах свыше 10 км на частотах выше 20 ГГц, может оказаться желательным учесть известные статистические данные по плотности водяных паров и температуры в непосредственной близости от трассы. Информация о плотности водяных паров приводится в Рекомендации МСЭ-R P.836.

### 3.3 Дифракционные замирания и просвет трассы

Снижение градиента преломления (рефракции) атмосферы в вертикальном направлении до величины значительно ниже медианного значения, равного примерно  $-40$  N единиц/км, может вызвать искривление пути прямой волны в направлении Земли. Если атмосфера достаточно "субрефрактивна", волна будет касаться земной поверхности, приводя к дифракционным потерям, которые иногда также называют потерями из-за препятствий или потерями вследствие неровностей Земли. Величина дифракционных потерь, которые считаются приемлемыми, является фактором, определяющим просвет трассы.

Величина отклонения преломляемости обычно описывается эффективным радиусом Земли, или коэффициентом  $k$ . Во избежание вычисления кривизны трассы при проектировании линии, вместо действительного радиуса Земли может использоваться эффективный радиус Земли. В случае такой модифицированной геометрии разность между трассой прямой волны и кривизной Земли становится постоянной, и трасса прямой волны может изображаться прямой линией, что помогает выявить возможные препятствия на профиле местности или земной поверхности. Коэффициент  $k$  представляет собой отношение эффективного и действительного радиусов Земли, для стандартной атмосферы он имеет медианное значение приблизительно  $4/3$ , в случаях субрефракции он имеет более низкие значения, и более высокие – в случаях суперрефракции, когда градиент преломления приближается к значению  $-157$  N единиц/км, коэффициент  $k$  стремится к бесконечности). Уравнение для коэффициента  $k$  приведено в Рекомендации МСЭ-R P.834.

В этом разделе исходное уравнение Рекомендации МСЭ-R P.530 для определения статистики дифракционных потерь впервые представлено вместе с процедурами для определения просветов трассы при основных и разнесенных антеннах. Приводятся примеры применений.

#### 3.3.1 Основа метода прогнозирования дифракционных потерь

Формула, включенная в Рекомендацию МСЭ-R P.530 для определения статистики дифракционных потерь, основана на измерениях усредненной местности в США [Vigants, 1981 г.]. В этом применении предполагается, что вероятность превышения заданной глубины дифракционных замираний, равна вероятности того, не превышен эффективный коэффициент  $k$ , давая соответствующее нормализованное значение просвета  $h/F_1$ , где  $h$  – это высота наиболее значительного препятствия на трассе и  $F_1$  – радиус первой зоны Френеля.

#### 3.3.2 Основа процедур определения просвета трассы

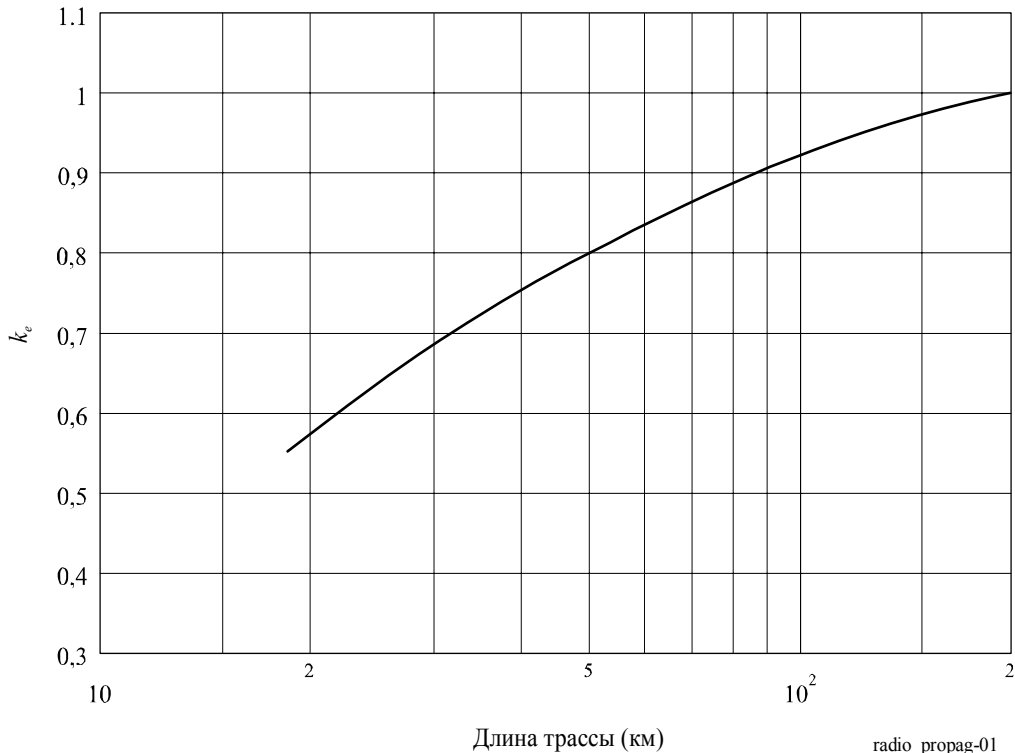
Процедуры Рекомендации МСЭ-R P.530 для определения просвета трассы для основной антенны и антенны пространственного разнесения были разработаны в отсутствие точной всемирной процедуры просвета трассы, которая определяет допуск на дифракционные замирания. Рисунок 1, воспроизведенный из Рекомендации МСЭ-R P.530, основан на измерениях трасс, полученных в умеренно континентальном климате [Voithias и Battesti, 1967 г.].

Приложенный к кривой рисунок для 99,9% остается несколько неопределенным. Было найдено, что применение величины эффективного коэффициента  $k$ , полученной из кривых на этом рисунке, дает приемлемый просвет для линий без разнесения антенн или линий с основными антеннами с пространственным разнесением длиной свыше 45 км с радиусом  $0,6 F_1$ . Однако, как отмечается в Рекомендации МСЭ-R P.530, меньшие доли  $F_1$  может быть приемлемы для частот менее 2 ГГц во избежание недопустимо больших высот антенн.

Для определения просветов трасс на основе известной величины дифракционных потерь были разработаны региональные методы [Калинин, 1979 г.; Надененко 1981 г.; Schiavone, 1981 г.; Vigants, 1981 г. и Олсен и Сегал, 1992 г.], и они могут служить основой в будущем для точной всемирной процедуры.

РИСУНОК 1

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



radio\_propag-01

### Пример расчета:

#### Параметры примера:

Длина трассы: 30 км

Климат тропический

Рабочая частота: 15 ГГц

Наиболее высокое клиновидное препятствие расположено в 10 км от передатчика.

Высота наиболее высокого препятствия: 30 м.

Доступные данные о медианном значении коэффициента  $k$  отсутствуют.

Ожидаемый просвет:  $1,0 F_1$ .

Шаги, представленные ниже, соответствуют процедуре, описанной в п. 2.2.2.1 Рекомендации МСЭ-R P.530 и используют данные для оценки необходимых высот антенны.

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

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} = 17,3 \sqrt{\frac{10 \cdot 20}{15 \cdot 30}} = 17,3 \sqrt{0,44} = 11,5 \text{ м.} \quad (4)$$

Вычисление кривизны Земли в точке доминирующего препятствия для  $k = 4/3$ , дает:  $b = 11,8$  м при радиусе Земли = 6360 км.

Предполагая, что высоты подвеса передающей и приемной антенн одинаковы, данный результат дает высоту антенн выше, чем  $30 + 11,5 + 11,8 = 53,3$  м.



*Шаг 2:* Получить значение  $k_e$  (99,9%) из Рисунка 1 для рассматриваемой длины трассы.

Из Рисунка 1 легко получить значение  $k_e$ :

$$k_e = 0,69.$$

*Шаг 3:* Повторяем приведенные выше расчеты для  $k = k_e = 0,69$ , кривизна Земли  $b = 22,8$  м. Значение  $0,6 F_1 = 6,9$  м дает высоту антенны равную  $30 + 6,9 + 22,8 = 59,7$  м.

*Шаг 4:* Окончательным результатом выбираем наибольшее значение высоты антенны  $59,7$  м.

### 3.4 Сцинтилляционные замирания

Турбулентные изменения показателя преломления могут привести к амплитудным сцинтилляциям и изменениям угла прихода принимаемого сигнала. Эти эффекты присутствуют на всех трассах прямой видимости на микроволновых частотах и выше, но могут маскироваться многолучевыми замираниями и связанными с ними явлениями.

Разница логарифма амплитуды принимаемого сигнала из-за сцинтилляций дана в Tatarskii [1967 г.]:

$$\sigma_x^2 = 42,25 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} \int C_n^2(r) r^{5/6} dr, \quad (5)$$

где:

$\sigma_x$ : стандартная девиация логарифма принятой мощности,

$\lambda$ : длина волны (м),

$C_n^2$ : структурная функция показателя преломления ( $\text{м}^{-2/3}$ ),

$r$ : расстояние вдоль трассы.

$C_n^2$  является макроскопическим параметром, изменяющимся во времени и пространстве, в первую очередь с изменением высоты. В течение периодов времени длительностью в десятки минут его значения на данной высоте могут различаться на несколько порядков. Наиболее высокие значения  $C_n^2$  находятся в планетарном пограничном слое, простирающемся от поверхности на высоту от 1 до 2 км, в зависимости от климата в регионе, времени года и времени суток. Типичные значения находятся в диапазоне  $10^{-14}$  до  $10^{-12}$  [COST 1996 г.], но могут изменяться от  $10^{-25}$  до  $10^{-10}$   $\text{м}^{-2/3}$  [Gossard, 1977 г.].

Эффект амплитудной сцинтилляции оказывает более значительное действие на спутниковых линиях. Измерения [Crane, 1976 г.] на частоте 7 ГГц, при углах места примерно  $3^\circ$  показывают флуктуации сигнала с уровнями от 0,1 дБ до примерно 1 дБ, в зависимости от угла места и условий. На частоте 100 ГГц, уровни масштабируются по частоте и лежат, соответственно, между 0,4 дБ и 3,8 дБ.

### 3.5 Обзор механизмов распространения радиоволн, связанных с многолучевыми замираниями

При нормальных условиях распространения радиоволн, должен быть только один путь распространения между двумя антеннами на радиорелейной линии прямой видимости. На практике, для некоторых процентов времени может существовать несколько путей распространения (многолучевость), и интерференция сигналов, пришедших по этим двум путям, может привести к значительным замираниям.

Замирания вследствие многолучевого распространения являются наиболее серьезным механизмом замираний в условиях ясного неба. В связи с тем, что многолучевые замирания частотно-селективны, вызванные ими искажения (см. п. 6) на всех уровнях амплитуды в широкополосной цифровой линии связи связь могут быть основной причиной перерыва в ее работе.

Механизмы распространения радиоволн, которые приводят к серьезным замираниям и воздействиям на фазу сигнала на горизонтальных трассах и трассах с низким углом наклона, обусловлены условиями многолучевого распространения, в которых нормальному прямому сигналу создаются помехи от дополнительных мешающих лучей.

Многолучевые условия распространения в целом связаны с отражением от:

- земли, воды или других поверхностных структур; или
- больших отрицательных величин градиента преломления в нижних слоях атмосферы (см. Справочник МСЭ-R – Радиометеорология) или
- сочетаний отражений от земли и слоев тропосферы.

При исследовании явления замираний следует различать медленные неселективные замирания, вызванные влиянием распространения радиоволн по одной трассе, которые также происходят в результате распространения в слоистой атмосфере и связаны с формированием каналов связи (Справочник МСЭ-R – Радиометеорология), и более быстрыми частотно-селективными замираниями, вызванными слоями с большим отрицательным градиентом преломления, расположенными ниже трассы, и наиболее высокими, в том случае, когда центр слоя расположен чуть ниже трассы [Olsen *и др.*, 1987 г.]. Часто происходит сочетание этих различных механизмов замираний.

#### **4 Ослабление в осадках и других частицах атмосферы**

##### **4.1 Ослабление в осадках**

Ослабление в дождевых осадках вдоль трассы распространения может быть рассчитано путем интегрирования удельного ослабления на длину трассы, если известно изменение интенсивности дождя.

Интенсивность дождя неравномерна в пространстве и времени. Модели изменения осадков, которые были разработаны для борьбы с этими сложностями, описаны в Справочнике МСЭ "Радиометеорология". Как известно, дождевые ячейки часто скапливаются внутри дождевых зон, иногда называемых малой областью [Segal, 1979 г. и Crane, 1979 г.]. Записи дождемера показывают короткие интервалы высокой дождевой интенсивности в длительные периоды слабого дождя. Радиолокационные метеонаблюдения показывают малые области высокой дождевой интенсивности, в большой области слабого дождя. Следовательно, наземные линии связи протяженность. Более 10 км могут проходить через несколько дождевых ячеек внутри дождевой зоны. Кроме того, при расчетах ослабления должна быть принята во внимание помеха, возникающая в зоне низкой интенсивности дождя, окружающего ячейку. Протяженность этих зон увеличивается с уменьшением интенсивности дождя и может достигать нескольких километров.

Основное различие методов, разработанных для прогнозирования статистики ослабления в дожде вследствие измерений интенсивности дождя, заключается в моделях, используемых для описания пространственно-временной структуры интенсивности дождя.

Метод "искусственного шторма" формирует статистику ослабления путем конвертации параметров интенсивности/времени, записанных в точке измерений в параметры интенсивности/расстояния, используя скорость преобразования дождевой модели, которую вычисляют как скорость ветра [Drufuca, 1974 г.; Bertok *и др.*, 1977 г. и Segal, 1982 г.].

Все другие методы заставляют использовать совокупные распределения интенсивности дождя в точке измерений. Некоторые методы вычисляют статистические параметры дождя вдоль трассы распространения, рассматривая единственную ячейку подходящей формы [Misme и Fimbel, 1975 г.] или статистическое распределение размеров для ячеек особой формы [Carsoni *и др.*, 1987 г.]. Другие методы характеризуют статистические параметры дождя, просто снижая коэффициент, который может быть вычислен из пространственной корреляционно функции дождя или из измерений высокоскоростного дождемера, распространенного вдоль линии [Harden *и др.*, 1978 г. и Crane, 1980 г.] или из полуэмпирического закона [Battesti и Voithias, 1978 г.]. Умножение интенсивности дождя в точке на этот коэффициент снижения дает эквивалент усредненной по расстоянию дождевой интенсивности.

Альтернативные процедуры заключаются в том, чтобы применить коэффициент снижения к фактической длине трассы, на котором интенсивность дождя может приниматься постоянной [Lin, 1975 г.; Garcia-Lopez и Peigo, 1983 г.; Moupfouma, 1984 г. и Dissanayake и Allnutt, 1992 г.]. Такого типа процедура в настоящее время принята в методологии Рекомендации МСЭ-R P.530.

##### **4.1.1 Основа метода прогнозирования ослабления в дожде**

Процедура прогнозирования ослабления, принятая в настоящее время в Рекомендации МСЭ-R P.530, была получена из анализа одновременного измерения интенсивности дождя и распространения, полученных главным образом в Европе, с некоторыми дополнительными данными из Японии и

Соединенных Штатов Америки. Она использует концепцию эффективной длины трассы, учитывая параметры неравномерности интенсивности дождя вдоль действительной трассы. Метод основан на вычислении ослабления, превышаемого в течение 0,01% времени ( $A_{0,01}$ ), от интенсивности дождя, превышаемой в течение того же процента времени ( $R_{0,01}$ ). Для данного значения  $R_{0,01}$  вычисляется удельное ослабление, которое для получения соответствующего значения  $A_{0,01}$  умножается на эффективную длину трассы:

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d \cdot \frac{1}{1 + d/d_0}, \quad (6)$$

где:

- $\gamma_R$ : удельное ослабление,
- $d$ : длина трассы,
- $d_0$ : эквивалентная длина дождевой ячейки.

Эмпирические уравнения используются для масштабирования на другой процент времени ( $p$ ), для обеспечения полного распределения ослабления. Эти уравнения выведены на основе экспериментальных данных. Для линий радиосвязи, расположенных на широтах, равных или более 30° (с. ш. или ю. ш.):

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)}. \quad (7)$$

Для линий радиосвязи, расположенных на широтах менее 30° (с. ш. или ю. ш.):

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,07 p^{-(0,855 + 0,139 \log_{10} p)}. \quad (8)$$

Оба уравнения были выведены для процента времени от 1% до 0,001% и их использование должно быть ограничено этими пределами. Концепция равной вероятности не согласуется с метеорологическими данными, и она не полностью удовлетворительна с теоретической точки зрения. Кроме того, так как метод использует только одну точку распределения интенсивности дождя, он дает в результате одинаковое распределение ослабления для двух мест с разными распределениями интенсивности дождя, но с одинаковым значением  $R_{0,01}$ . Однако было отмечено, что распределения ослабления имеет тенденцию быть более сходными друг с другом, чем распределения интенсивности дождя. В любом случае, точность, получаемая в методе предсказания для наземных линий связи, согласуется с качеством и изменчивостью доступных данных об интенсивности дождя.

#### 4.1.2 Удельное ослабление

Удельное ослабление  $\gamma_R$  (дБ/км) на данной частоте может быть получено из интенсивности дождя, вытекающей из известного комплексного показателя преломляемости воды при температуре дождевых капель, конечной скорости и области распределения дождевых капель [Ryde и Ryde, 1945 г.; Medhurst, 1965 г. и Setzer, 1970 г.]. Вследствие несферической формы капель дождя горизонтально поляризованные волны подвержены ослаблению в большей степени, нежели вертикально поляризованные волны [Morita и др., 1974 г. и Chu, 1974 г.]. В некоторых климатических областях разность в ослаблении может достигать значений до 35% [Fedi и др., 1977 г. и Fimbel и Juy, 1977 г.]. Удельное ослабление для вертикальной и горизонтальной поляризации, для частот до 100 ГГц, может быть получено из расширенных расчетов, учитывающих несферическую форму капель дождя [Oguchi и Hosoya, 1974 г.; Chu, 1974 г. и Oguchi, 1977 г.].

Для практического применения отношение между удельным ослаблением  $\gamma_R$  (дБ/км) и интенсивностью дождя курса  $R$  (мм/ч), можно аппроксимировать степенным законом [Olsen и др., 1978 г.]:

$$\gamma_R = k R^\alpha. \quad (9)$$

Принимая предположение сферических капель, значения  $k$  и  $\alpha$  были рассчитаны для ряда частот в диапазоне от 1 до 1000 ГГц для нескольких температур капель и распределений размеров капель [Olsen и др., 1978 г.].

Последние работы, проведенные Gibbins и Walden [2003 г.] представили результаты комплексного исследования о характере параметров  $k$ , и  $\alpha$ . Эти результаты явились основой Рекомендации МСЭ-R P.838.

Значения коэффициентов  $k$  и  $\alpha$  в диапазоне от 1 до 1000 ГГц определяются как функции частоты  $f$  (ГГц) из уравнений Рекомендации МСЭ-Р Р.838, которые были выведены из подбора эмпирической кривой по степенным коэффициентам, полученным в результате расчетов рассеяния.

Значения констант, используемых при расчете коэффициентов  $k_H$ ,  $k_V$ ,  $\alpha_H$  и  $\alpha_V$ , необходимых для расчета  $k$  и  $\alpha$ , могут быть получены из Рекомендации МСЭ-Р Р.838.

Более подробное описание взаимосвязи между удельным ослаблением и интенсивностью дождя приводится в Справочнике МСЭ-Р "Радиометеорология".

#### 4.1.3 Эффективная длина трассы

Эффективной длиной трассы в наземных линиях связи является длина гипотетической трассы, полученной из данных распространения радиоволн путем деления общего ослабления, превышаемого в 0,01% времени, на удельное ослабление, превышаемое в течение того же процента времени.

Коэффициент ослабления трассы определяется как:

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0}. \quad (10)$$

Данное уравнение получено на основе двух допущений:

- пространственную структуру дождя можно смоделировать эквивалентными дождевыми ячейками с прямоугольным поперечным сечением эквивалентной длины  $d_0$  в плоскости трассы;
- дождевые ячейки с прямоугольным поперечным сечением могут занимать любое положение относительно трассы с равной вероятностью.

Эффективная длина трассы  $d_{eff} = dr$  соответствует средней протяженности пересечения наземной трассы и длины случайно расположенной эквивалентной дождевой ячейки  $d_0$ , превышаемой в 0,01% времени.

Длина  $d_0$  эквивалентной дождевой ячейки изначально предполагалась постоянной, но затем модель была улучшена зависимостью от интенсивности дождя [Yamada и др., 1987 г.]:

$$d_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}}. \quad (11)$$

Для  $R_{0,01} > 100$  мм/ч вместо  $R_{0,01}$  используется величина 100 мм/час.

Хотя это уравнение основано на данных наклонных трасс с ослаблением в дожде, оно было успешно проверено результатами измерений ослабления в дожде на наземных линиях связи.

#### 4.1.4 Примеры применений

Местоположение: Рио-де-Жанейро, Бразилия

Широта: 22° 50' с. ш.

Долгота: 317° 00' в. д.

Частота:  $f = 13$  ГГц

Длина трассы:  $d = 20$  км

Линейная поляризация:  $\tau = 90^\circ$ .

*Шаг 1:* Применяя Рекомендацию МСЭ-Р Р.837 (карты интенсивности дождя) для данного местоположения, получаем  $R_{0,01} = 59,67$  мм/ч для интенсивности дождя, превышаемой в течение 0,01% времени.

*Шаг 2:* Удельное ослабление  $\gamma_R$  вычисляется с использованием Рекомендации МСЭ-Р Р.838 для интересующей частоты, поляризации и интенсивности дождя. В результате  $\gamma_R$  равно 2,82 дБ/км.

Шаг 3: Вычисление эффективной длины трассы производится как  $d_{eff} = d \times r = 20 \times 0,42 = 8,34$  км, что позволяет вычислить оценку ослабления на трассе, превышаемого в течение 0,01% времени:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = 23,4 \text{ дБ.} \tag{12}$$

В заключение, используя формулу, которая соответствует линиям радиосвязи ниже 30°, ослабление в дожде, превышаемое в течение 0,001%, 0,01%, 0,1% и 1% времени, составляет  $A_{0,001} = 33,9$  дБ,  $A_{0,01} = 23,4$  дБ,  $A_{0,1} = 8,5$  дБ и  $A_1 = 1,6$  дБ, соответственно.

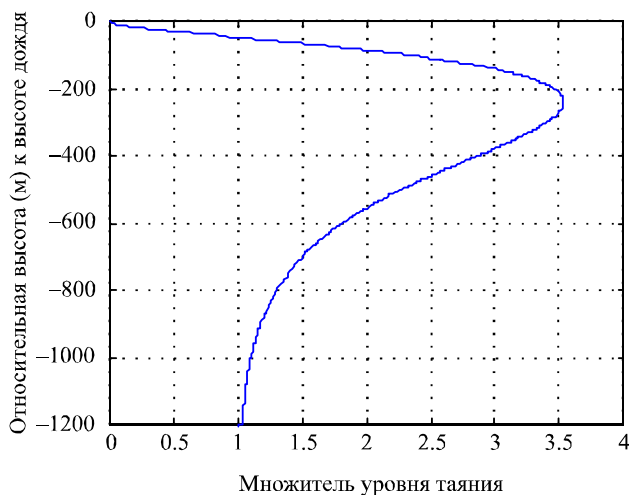
#### 4.1.5 Прогнозирование сочетания дождя и мокрого снега

Метод из Рекомендации МСЭ-R P.530, основан на предположении, сделанном в 2002 году Bacon и Eden, и его дальнейшей разработки с приближенной реализацией, подобной той, что дана Tjelta и др. [2005 г.]. Этот метод использует глобальную карту высоты дождя и косвенную информацию для оценки количества мокрого снега, и среднего ослабления профиля для получения превышения ослабления на уровне таяния. Кроме того, он учитывает определенные распределения высоты осадков или изотермы нулевого градуса, а также то, что превышение ослабления фиксированной формы уровня таяния является функцией от положения этого уровня. С помощью таких данных можно прогнозировать ослабление распределения на любой линии связи ссылку, принимая во внимание, как дождь, так и мокрый снег.

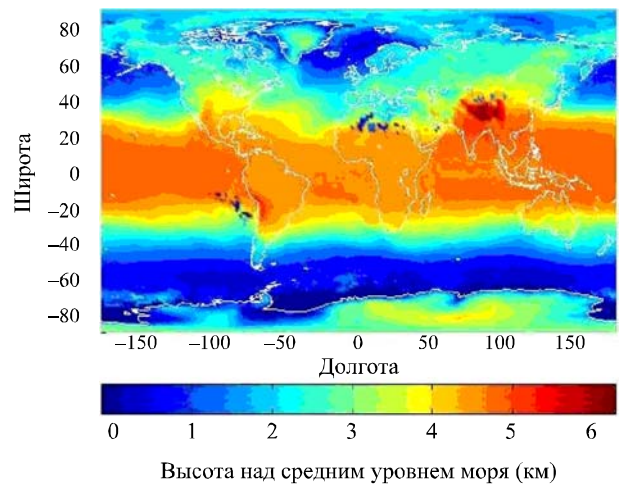
Уровень таяния состоит из смеси льда, воды и воздуха. Падающие ледяные гидрометеоры тают, сливаются, а затем разделяются на отдельные капли дождя. Выпадение осадков в виде мокрого снега может произойти на трассе распространения радиоволн, когда температура воздуха составляет около 0° С. Теория ослабления в дожде хорошо понятна и смоделирована для используемых диапазонов частот. Теоретические коэффициенты ослабления установлены для различных размеров и форм частиц, а конкретные упрощенные модели установили зависимость ослабления от частоты и поляризации, а также угла трассы по отношению к главной оси крупных несферических капель дождя. Напротив, частицы мокрого снега вызывают значительно более серьезные трудности при моделировании, но определенные попытки сделаны. Теоретический анализ распространения радиоволн через уровень таяния использует модели плавающих частиц льда. Найдено, что частицы мокрого снега имеют больший коэффициент ослабления, чем капли дождя при одинаковом количестве воды, что вызывает превышение удельного ослабления по сравнению с дождем [см. Jain и Watson, 1985 г. и Kuznetov и др., 2000 г.] во время проведения последнего анализа. В радиолокации используется термин "яркая полоса" из-за наблюдаемого сильного радиолокационного эха от этого уровня. В дополнение к ослаблению основной поляризации, анизотропный характер частиц мокрого снега также может привести к некоторой деполяризации.

РИСУНОК 2

а) Множитель для оценки дополнительного ослабления на уровне таяния по сравнению с дождем



б) Изотерма при нуле градусов



radio\_propag-02

Метод прогнозирования для комбинированного дождя и мокрого снега, представленный в данном документе, использует упрощенную аппроксимацию. Множитель вводится для описания того, отличается ли погонное ослабление от ослабления в дожде. Множитель равен 1 для дождя, и больше 1 для мокрого снега, его максимум немного превышает 3,5Ю он равен 0 для сухого льда или снега. Модель, приведенная в уравнении (18), графически показана на Рисунке 2а), множитель представлен как функция от вертикального положения уровня таяния относительно верхней границы дождя.

Множитель описывается  $\Gamma(h)$ :

$$\Gamma(h) = \begin{cases} 0 & 0 < h \\ \frac{a(1 - e^{h/b})^2}{\left(1 + \left(1 - e^{-(h/c)^2}\right)^2 \left(a(1 - e^{h/b})^2 - 1\right)\right)} & h \leq 0, \end{cases} \quad (13)$$

где константы  $a = 4$ ,  $b = 70$ , и  $c = 600$ . В грубом приближении значения этих трех коэффициентов оказывают воздействие на максимальное значение множителя, его положение относительно верхней части и глубине уровня, соответственно. Эта функция асимптотически приближается к 1 для больших отрицательных значений  $h$ , в частности она равна 1 для  $h < -1400$  при указанных  $a$ ,  $b$ , и  $c$ .

На практике множитель, используемый для прогнозирования, является интегралом коэффициентов умножения, взвешенных с функцией плотности вероятности относительной высоты уровня таяния вдоль трассы. Множитель установлен по отношению к высоте изотермы при нуле градусов.

Метод предсказания для комбинации дождя, мокрого снега и сухого снега прост и использует следующие допущения:

- Уровень осадков известен, например, из карт в Рекомендации МСЭ-R P.837;
- Осадки подразделяются на дождь, мокрый снег и сухой снег или лед используя высоту, как показано на карте в Рекомендации МСЭ-R P.839, и модель уровня таяния аналогична описанной выше;
- Распределение ослабления при сочетании дождя и снега такое же, как распределение для одного дождя.

Ключевой момент метода заключается в определении множителя с учетом вклада мокрого и сухого снега. Если наблюдаются все осадки, этот множитель будет равен 1, и не будет никаких изменений по сравнению с результатами применения используемой сегодня процедуры (см. Рекомендацию МСЭ-R P.530). Однако, если все наблюдаемые осадки присутствуют в виде сухого снега или льда, то множитель равен 0, и ослабление оценить невозможно. Совершенно очевидно, что это отличается от существующего метода. В реальных случаях, поскольку в течение года высота нуля градусов колеблется, большая часть осадков будет выпадать в виде дождя, с небольшим количеством мокрого и сухого снега. Ослабление в мокром снеге может быть значительно больше, чем в дожде. Таким образом, учитывая все возможности, вероятно коэффициент будет больше 1, так что должен быть разрешен некоторый дополнительный запас для мокрого снега.

В процедуре должны быть установлены и использованы две функции: средняя высота дождя, полученная из высоты изотермы для нуля градусов, и ее изменение или распределение. Данные по высоте дождя приводятся в Рекомендации МСЭ-R P.839. Данные о высоте уровня нуля градусов приведены на Рисунке 2б). Предполагается, что высота дождя распределена по нормальному закону при среднем нулевом значении со стандартной девиацией 800 м. В настоящее время принимается, одно и то же распределение для всего мира. Ослабление  $A_p$ , превышаемое в течение  $p$  процентов времени, приведенное в предыдущем подразделе, действительно для линий связи, на трассах которых выпадает только жидкий дождь. В Рекомендации МСЭ-R P.530 приведены пошаговые процедуры.

На Рисунке 3 показан пример процедуры для отдельных городов от экватора до Северного полюса. Для среднего года дополнительное ослабление из-за мокрого снега оценивается величиной до 10 дБ при  $p = 0,001\%$ .

РИСУНОК 3

Оценка ослабления в мокром снеге, проведенная для  $p = 0,001\%$  среднего значения за год для некоторых городов от экватора до Северного полюса

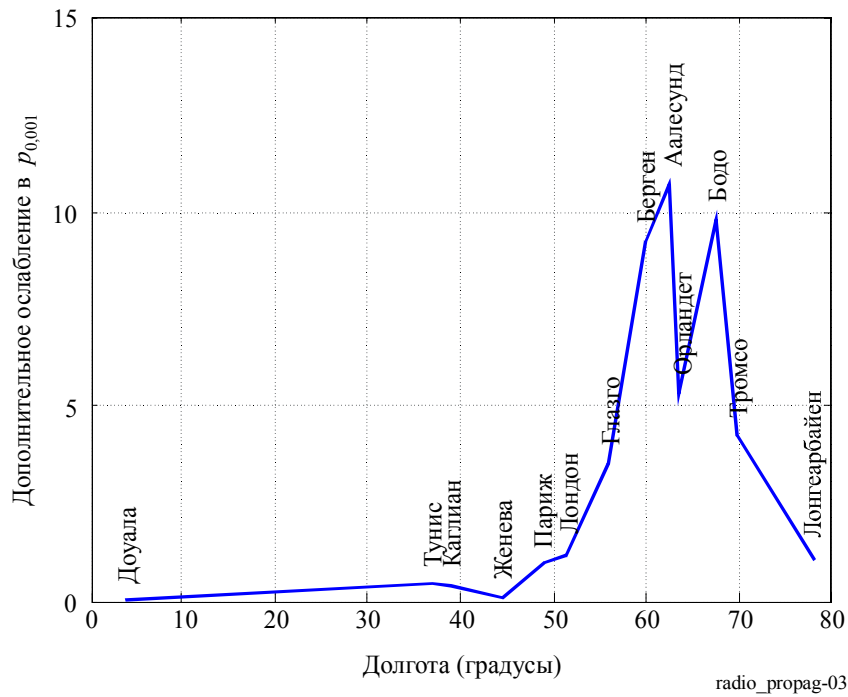
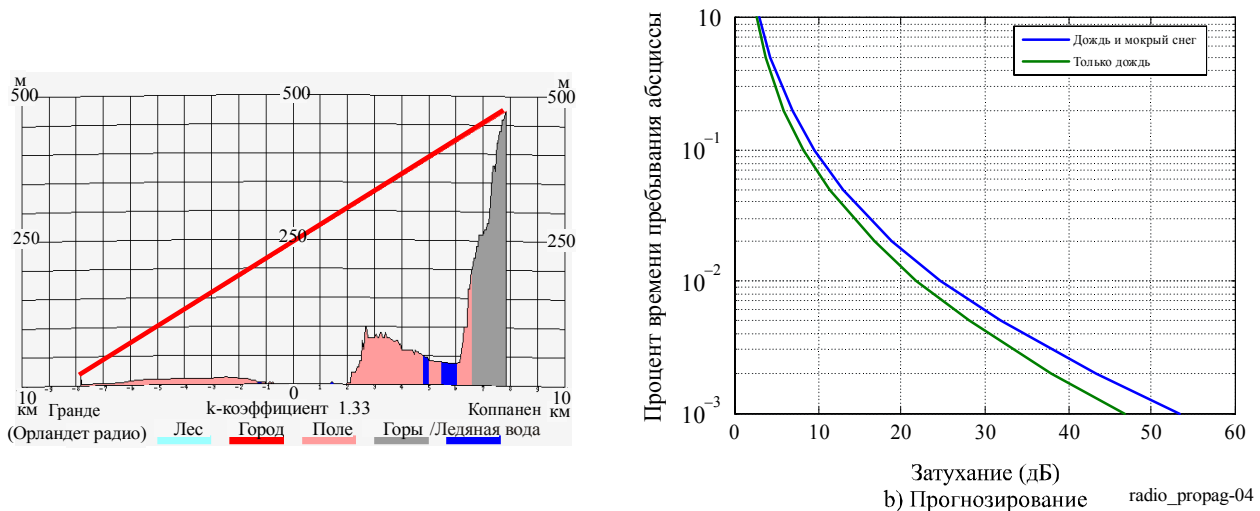


РИСУНОК 4

Пример прогнозирования для прибрежной линии в Норвегии (Тьелта и др., 2006 г.), использующий усредненный коэффициент размножения для наклонных трасс



В настоящее время результаты тестирования отсутствуют. В ряде публикаций приведены измерения, показывающие превышения ослабления из-за мокрого снега. Такие данные, охватывающие Японию, Канаду, Соединенное Королевство и Норвегию смотрите в публикациях [Takada и Nakamura, 1966 г.; Nishitsuji, 1971 г.; Hendry и др., 1981 г.; Gutteberg, 1983 г.; Kharadly и др., 1983 г.; Kharadly и Owen, 1988 г.; Thurai и Woodroffe, 1997 г.; Walden и др., 2003 г.; Tjelta и др., 2005 г. и Tjelta и др., 2006 г.].

#### 4.1.6 Долгосрочное масштабирование частоты и поляризации статистических данных о ослаблении в дожде

##### 4.1.6.1 Масштабирование для одной частоты

Если доступны только данные об ослаблении, измеренные на одной частоте, то может применяться эмпирическая формула из Рекомендации МСЭ-R P.530, в которой коэффициент ослабления приводится как функция частоты и ослабления, для частотного масштабирования на той же трассе в диапазоне частот от 7 до 50 ГГц (и условно до 100 ГГц):

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^{1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)}, \quad (14)$$

где:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2}, \quad (15)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_1, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55}. \quad (16)$$

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

Считается, что эта формула лучше всего эмпирически подходит к доступным данным масштабирования [Boithias, 1989 г.]. Так как точность этой процедуры составляет примерно 10%, то, обычно, когда из расчетов доступны данные о долгосрочном распределении, должна применяться техника частотного масштабирования.

Более подробно частотное масштабирование рассмотрено в Справочнике МСЭ-R "Радиометеорология", где в качестве альтернативного приводится метод, в котором использованы константы  $k$  и  $\alpha$ , и который поэтому лучше подходит, когда требуется масштабирование поляризации. Некоторые другие методы применяют статистические данные об ослаблении, полученные на двух частотах, или информацию об угле места для предсказания ослабления на другой частоте.

##### 4.1.6.2 Поляризационное масштабирование

Если доступны только данные об ослаблении, измеренные для одной поляризации (вертикальной или горизонтальной), то для поляризационного масштабирования равновероятных значений ослабления в дожде в пределах диапазона длины трассы и частоты метода предсказания ослабления могут применяться уравнения (37) и (38) из Рекомендации МСЭ-R P.530 [Boithias, 1983 г.].

Поляризационное масштабирование должно применяться только к результатам измерений или вычислений ослабления из-за дождя. Следует добавить дополнительное ослабление из-за поглощения в газах. Выражения, приведенные в Рекомендации МСЭ-R P.530, являются общим соглашением с результатами экспериментов и с предположениями, использующими определенные коэффициенты ослабления из Рекомендации МСЭ-R P.838:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{дБ} \quad (17)$$

или

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{дБ}. \quad (18)$$

Эти выражения считаются справедливыми для методов предсказания ослабления в дожде в некотором диапазоне значений длины трассы и частоты. Однако следует заметить, что результаты вычисления коэффициентов поляризационного масштабирования, использующих радиолокационные данные, предполагают, что они будут использованы для обычного, а не для слоистого дождя. Это может вызвать некоторую климатическую зависимость.

##### 4.1.7 Статистические данные длительности и коэффициента замирания, вызванного дождем

Процедуры определения статистических данных длительности замираний, вызванных дождем, можно найти в Рекомендации МСЭ-R P.530.

Хотя пока еще есть мало информации по общему распределению длительности замираний, существуют некоторые данные и эмпирические модели для определенных статистических данных, например, средней



длительности события ослабления и некоторых таких случаев. Наблюдаемая разница между усредненными и средними значениями указывает, однако, на асимметрию общего распределения длительности. Также существует веское доказательство того, что длительность случаев замирания в условиях дождя гораздо больше, чем в условиях многолучевого распространения.

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

$$N(A) = T(A) / D_m(A). \quad (19)$$

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

Число событий замираний, превышающих уровень ослабления  $A$  в течение 10 с или более, может быть представлено так:

$$N_{10\text{с}}(A) = a A^b, \quad (20)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, которые предположительно зависят от частоты, длины трассы и других переменных факторов, например, климата.

На основе одного набора измерений для трассы длиной 15 км на частоте 18 ГГц на Скандинавском полуострове, значения  $a$  и  $b$ , оцениваемые для одногодичного периода, равны:

$$a = 5,7 \times 10^5 \quad b = -3,4. \quad (21)$$

После того как из уравнения (20) было получено значение  $N_{10\text{с}}(A)$ , средняя продолжительность события замираний, составляющая 10 с или более, может быть вычислена посредством инвертирования уравнения (19).

Основываясь на указанном наборе измерений, выполненных на Скандинавском полуострове для трассы длиной 15 км на частоте 18 ГГц, 95%–100% всех событий дождя, превышающих примерно 15 дБ, могут быть приписаны неготовности. При такой известной доле событий готовность может быть получена путем умножения этой доли на общий процент времени, когда данное ослабление  $A$  превышает, как определено по методу, представленному в Рекомендации МСЭ-R P.530.

#### 4.1.8 Сезонные колебания – худший месяц

Системное планирование часто требует, чтобы значение ослабления превышалось процентным отношением времени  $P_W$  "худшего месяца" (см. Рекомендацию МСЭ-R P.581).

Переход от ежегодных статистических данных к статистическим данным "худшего месяца" подробно обсуждается в Рекомендации МСЭ-R P.841. Соотношение между  $P_W$  и годовым процентным отношением времени,  $P$ , можно выразить как:

$$P = Q_1^{\frac{1}{1-\beta}} P_W^{\frac{1}{1-\beta}}. \quad (22)$$

Приведенное выше выражение применимо к диапазону вероятностей ( $0,001\% < P < 3\%$ ). В Рекомендации МСЭ-R P.841 указаны значения  $Q_1$  и  $\beta$ , найденные в разных местах и для нескольких воздействий распространения. Для целей глобального планирования может быть предпочтительней отдельное "усредненное" отношение, использующее  $Q_1 = 2,85$  и  $\beta = 0,13$ , которое дает:

$$P = 0,3 P_W^{1,15}. \quad (23)$$

Результаты измерений, полученные в разных климатических зонах, показывают, что соотношение ежегодного усредненного процентного отношения времени худшего месяца к усредненному ежегодному процентному отношению времени отчасти зависит от климата. Приведенное выше уравнение соответствует климатическим зонам с относительно небольшими сезонными колебаниями в интенсивности осадков. Для Средиземноморской и Северо-Западной Европы и других регионов, показывающих схожие сезонные колебания в осадках, указанное выше значение  $P$  должно быть уменьшено на 20%, а для более предельных случаев это значение  $P$  нужно уменьшить на 30%.

#### 4.1.9 Обсуждение оценки модели (испытание)

В Рекомендации МСЭ-R P.311 представлены критерии испытаний для сравнения методов прогнозирования, включая определение переменной испытания для сравнения предсказаний ослабления в дожде.

В результате всесторонних испытаний, проведенных на основе доступных методов и данных, было предложено принять метод из п. 2.4.1 Рекомендации МСЭ-R P.530 и выяснилось, что достижимая точность составляет примерно 25%–30% на общей основе для процентного отношения времени 0,001% и 0,1%. Долгосрочные статистические данные, особенно из тропических регионов, нужны для улучшения точности прогнозирования.

Для процентного отношения времени, превышающего 0,1%, следует напомнить, что результаты измерений интенсивности дождя будут стремительно становиться неточными, так как уменьшаются показатели дождя. В частности, в таких процентных отношениях времени газовое поглощение может стать обязательным для рассмотрения, и его следует добавить для прогнозирования ослабления в дожде.

#### 4.1.10 Пример вычислений

В качестве примера будет рассчитано распределение ослабления в дожде для линии связи со следующими характеристиками:

Рабочая частота: 18 ГГц

Широта средней точки: 12° 00' 00"

Долгота средней точки: 44° 00' 00"

Длина трассы: 10 км

Поляризация: вертикальная.

*Этап 1:* Коэффициент дождя  $R_{0,01}$ , превышаемый в течение 0,01% времени (со временем интеграции 1 мин) должен быть получен, предпочтительно, из местных источников долгосрочных измерений. Если они недоступны, средний показатель можно получить из информации, указанной в Рекомендации МСЭ-R P.837. В этой Рекомендации представлены рисунки для быстрого вычисления  $R_{0,01}$ , а при помощи метода для более точного вычисления этого параметра в этом случае получается значение  $R_{0,01} = 50$  мм/час. Следует заметить, что хотя указывается на применение географических координат средней точки линии связи, использование координат одной из ее крайних точек не приведет к серьезной ошибке при вычислении.

*Этап 2:* При помощи Рекомендации МСЭ-R P.838 вычисляется особое ослабление,  $\gamma_R$  (дБ/км).

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k, \quad (24)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[ - \left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha, \quad (25)$$

где:

$f$ : частота (ГГц),

$k$ : или  $k_H$  или  $k_V$ ,

$\alpha$ : или  $\alpha_H$  или  $\alpha_V$ .

Коэффициенты  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_k$ ,  $m_k$ ,  $c_\alpha$  и  $m_\alpha$  указаны в Рекомендации МСЭ-R P.838. Коэффициенты  $k$  и  $\alpha$  могут иметь горизонтальную (H) или вертикальную поляризацию (V). При помощи этих уравнений можно получить значения для вертикальной поляризации  $\alpha(18 \text{ ГГц}) = 1,002505$  и  $k(18 \text{ ГГц}) = 0,077076$ . Особое ослабление составляет:

$$\gamma_R = k R_{0,01}^\alpha = 3,89 \quad \text{дБ/км}. \quad (26)$$

Этап 3: Вычисление эффективной длины трассы  $d_{eff}$ :

$$d_0 = 35 \exp(-0,015 R_{0,01}) = 16,53 \text{ км}, \quad (27)$$

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} = 0,623, \quad (28)$$

$$d_{eff} = d \cdot r = 6,23 \text{ км}. \quad (29)$$

Этап 4: Вычисление ослабления на трассе, превышающее 0,01% времени:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = 24,2 \text{ дБ}. \quad (30)$$

Этап 5: Перевод для других процентных отношений времени:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)}. \quad (31)$$

$p$ (%)	$A_p$ (дБ)
1	2,9
0,1	9,2
0,01	24,2
0,01	51,7

Этап 6: Если необходимы статистические данные за худший месяц, производятся вычисления годового процентного отношения времени  $p$ , соответствующего процентному отношению времени худшего месяца  $p_w$  при помощи информации о климате, указанной в Рекомендации МСЭ-R P.841. С целью глобального планирования:

$$p (\%) = 0,30 p_w (\%)^{1,15}. \quad (32)$$

Для этого примера получается:

$p_w$ (%)	$p$ (%)	$A_p$ (дБ)
1	0,3	5,5
0,1	0,021	18,1
0,01	0,0015	45,9

## 4.2 Спаренные и сходящиеся трассы

### 4.2.1 Коррелированные замирания на транзитных трассах

Общая производительность передачи для спаренных систем в большой степени зависит от характеристик распространения на отдельных линиях. Для определения вероятности длинных пролетов и малых перерывов связи вероятность совместных замираний в двух или более пролетах незначительны. При этих условиях общая вероятность перерыва связи для цепочки спаренных линий

будет равна сумме вероятностей перерыва связи для отдельных линий связи [Peroni и Fedi, 1974 г.], как указано в Рекомендации МСЭ-R P.530:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (33)$$

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

Для коротких пролетов (т. е. сопоставимых с размерами структуры ослабления в дожде), соседние каналы будут затронуты одновременно, приводя к общей вероятности перерыва связи меньше суммы отдельных вероятностей. Как указывается в Рекомендации МСЭ-R P.530:

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i, \quad (34)$$

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

Измерения в Японии на цепочке линий связи длиной 4,5 км показали это условие. При вероятности перерыва связи в отдельной линии связи 0,03%, наблюдалось уменьшение числа перерывов на коэффициент примерно 0,8 для перерыва связи на двух пролетах, и 0,7 – для четырех пролетов [Sasaki и др., 1976 г. и Morita и Higuti, 1978 г.].

Вычисления на основе функции пространственной корреляции для дождя, полученные на широко разнесенных точках в Канаде, показывают, что сходные факторы уменьшения применимы для больших протяженностей пролета, состоящих из десяти последовательных пролетов длиной от 10 до 20 км каждый. Для еще больших протяженностей пролета одновременное замирание важно только в случае больших вероятностей происшествя [Segal, 1982 г.].

На основе этих экспериментов и вычислений в Рекомендации МСЭ-R P.530 представлены графики коэффициента модификации  $K$ , в функции от числа пролетов равной длины для трассы разных протяженностей и для разного процентного отношения времени, учитывающего длину трассы, равную 4,6 км.

#### 4.2.2 Сходящиеся трассы

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 из пункта в зону, его можно использовать в целях получения некоторой общей картины улучшения, обеспечиваемой такими элементами сети с разнесенными (или объединенными) маршрутами "пункта с пунктом".

Вследствие произвольного временного и пространственного распределения интенсивности дождя, сходящиеся линии из пункта в пункт будут в каждый момент времени испытывать замирания различной глубины. В результате может наблюдаться ухудшение отношения сигнал/помеха между линиями от пользователей в различных угловых секторах, когда полезный сигнал ослабляется на трассе за счет дождя, а мешающий сигнал не ослабляется.

Дифференциальное кумулятивное распределение величины ослабления в дожде для двух сходящихся линий, работающих на одной и той же частоте, может быть вычислено по формуле (см. Примечание 1):

$$A_{12}(p) = [A_1(p) - 0,34 A_2(p)] \left( 2,65 |\theta|^{0,23} + 0,004 |\Delta d|^{2,25} \right) f^{-0,4} \text{ дБ}, \quad (35)$$

где:

$p$ : процент времени между 0,01% и 1%,

$f$ : частота (ГГц),

$\Delta d$ : разность длин трасс (км),

$\theta$ : угол (рад) между линиями от 0° до 180°.

$A_1(p)$  и  $A_2(p)$ : значения ослабления в дожде на отдельных линиях, превышаемые в течение  $p\%$  времени, рассчитанные с использованием метода, приведенного в Рекомендации МСЭ-R 530.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Уравнение (35) основано на результатах измерений 36 пар сходящихся линий на частотах в диапазоне от 15 до 38 ГГц и с длинами трасс в диапазоне от 1 до 23 км.

### 4.3 Трассы с пассивными ретрансляторами

В Рекомендации МСЭ-R P.530 приведены процедуры для расширения однопролетовых процедур для трасс с пассивными ретрансляторами с двумя или более пролетами на основе работы Карла и Перссона [1998 г.].

В случае плоских отражателей процедура проста и заключается в том, что требуется вставить общую длину трассы в уравнение (32) для коэффициента уменьшения расстояния из упомянутой Рекомендации. Этот подход является наиболее точным, если пролеты приблизительно параллельны друг другу. Отклонение пролетов от параллельных будет иметь общее воздействие, увеличивая единообразие дождя по всей трассе, так как расстояние между конечными точками уменьшается в соответствии с размером дождевой ячейки. Это, в свою очередь, вызовет ослабление, которое будет недооценено, так как коэффициент уменьшения тоже будет недооценен. Неисследованный подход для примерного устранения этого воздействия приведен в упоминавшейся выше Рекомендации.

В случае использования на пролетах ретрансляторов с двухзеркальной антенной одинаковой поляризации, процедура идентична процедуре для плоского отражателя. Для переменных вертикальных и горизонтальных поляризаций ослабление рассчитывается по всей трассе для одной поляризации, а затем для другой, потом вычисляется простое взвешенное среднее на основе реальной длины трассы для каждой поляризации.

## 5 Многолучевые замирания и улучшение на единичной частоте

Распределение многолучевых замираний на единичной частоте или в узкой полосе пропускания является единственным средством оценки перерывов в работе вследствие этого явления на аналоговых линиях. Они также являются основным элементом фактически во всех методах оценки перерывов в работе на цифровых линиях. Улучшение распределений в условиях многолучевости является важным при вычислении помех и вычислениях насыщения приемника (см. Справочник по цифровым радиорелейным системам МСЭ-R).

В этой главе основа и точность методов прогнозирования, изложенных в Рекомендации МСЭ-R P.530 для оценки замирания на единичной частоте и улучшение распределений, представлены в п. 5.1. Для помощи в применении этих методов, изложенных ниже, пример с решением основан на настоящих линиях. Хотя процедуры прогнозирования даны среднего количества и продолжительных замираний пока не доступны, процедуры оценки основаны на имеющихся ограниченных экспериментальных данных, представленных в п. 5.2. Имеющиеся данные о скорости изменения уровня сигнала рассмотрены в п. 5.3. Наконец, многолучевые замирания на тандемных линиях рассмотрены в п. 5.4.

В силу их особой важности на цифровых радиолиниях, искажения, связанные с частотно-избирательной природой многолучевых замираний рассмотрены отдельно в п. 6. Поскольку разные методы являются важным средством уменьшения и явления многолучевых замираний и сопутствующих искажений, они рассмотрены отдельно в п. 8.

### 5.1 Прогнозирование замираний/улучшение распространения

Четыре дополнительных метода, разработанные для прогнозирования различных частей замирания/улучшений распределения для среднего наихудшего месяца в любой точке земного шара, приведены в Рекомендации МСЭ-R P.530. Два метода предназначены для определения распределения в области глубоких замираний, Метод 1 предназначен для детального проектирования линий и Метод 2 – для предварительного планирования или лицензирования. Эти методы служат основой вычислений для метода интерполяции для малой области замираний и метода для улучшения области значений. Основа каждого из этих методов рассмотрена в пп. 5.1.1–5.1.3 наряду со сводными результатами испытаний. Примеры, использующие все методы, представлены в п. 5.1.4.

#### 5.1.1 Основы и точность Методов 1 и 2

##### 5.1.1.1 Полное распределение, полученное с хвоста

Глубокие замирания сигнала соответствуют рэлеевскому распределению. Это признается в течение очень долгого времени [Pearson, 1965; Morita *и др.*, 1974 г. и Barnett, 1972 г.], и более детальное изучение данных измерения поддерживало это представление [Tjelta *и др.*, 1990 г.].

Общепринятый подход заключается в том, чтобы предположить, что каждая линия и переменная климат/район независимо друг от друга вносят вклад в область глубоких замираний. Поэтому была принята степенная модель области глубоких замираний. В общем виде вероятность  $p_w$  (часто вычисляется в процентах) того, что глубина замирания  $A$  превышает, определяется как:

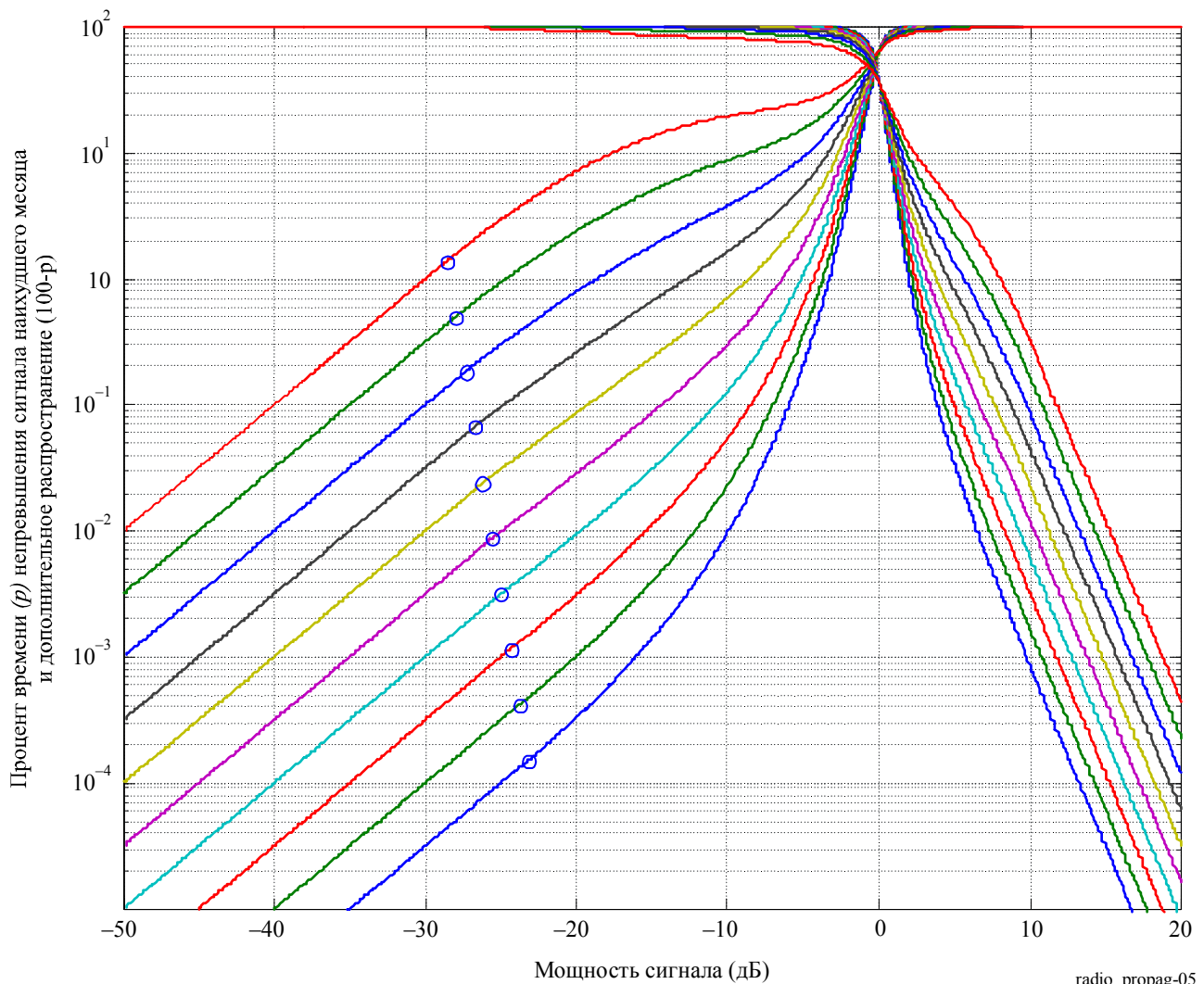
$$p_w = \prod_i g_i(x_i) 10^{-A/10}, \quad (36)$$

где  $i$  –  $i$ -ая линия и значение переменных  $x_i$  и  $g_i$  являются ее функциями. Экспоненциальные функции переменных были общими, где экспонента показывает прямой признак важности показателя.

Легко находится полное распределение, как только был найден конец глубоких замираний. Рисунок 5 показывает семейство многолучевых замираний и улучшения распространения. Маленький круг на каждой кривой показывает, где заканчивается наклон Рэлеевской кривой. Значение между этими характерными точками и 0 дБ составляет 67,7%, кроме того, использовалась интерполяция. В области улучшения следует распространение за фиксированным наклоном выше 10 дБ, основанное на эмпирических анализах данных измерения [Tjelta и Tanem, 1992 г.] и интерполяции между 0 дБ и 10 дБ.

РИСУНОК 5

Пример семейства многолучевых замираний и улучшения распространения



### 5.1.1.2 Определение хвоста распределения многолучевых замираний

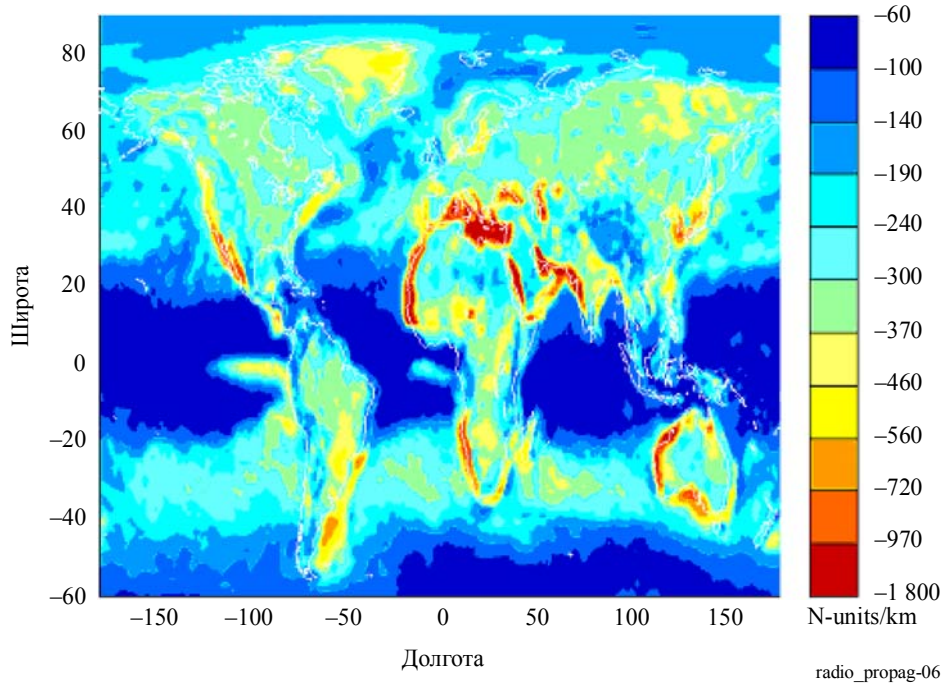
Два метода, представленные МСЭ-R, изложены в Рекомендации МСЭ-R P.530. Оба метода разделены на (1), в первой части, описывающей климат, геоклиматический параметр  $K$  и другие соответствующие переменные линии. Климатическая часть основана на вероятности большого отрицательного значения коэффициента рефракции в области, где метод наибольшей точности также

использует неровность поверхности. На Рисунке 6 показана карта градиентов рефракции, не превышающих 1% среднего года [Tjelta и др., 1998 г.]. Таблица этих данных в любом требуемом местоположении Земли доступна в Рекомендации МСЭ-R P.453.

Методы вдоль этих линий исследовались и обычно принимались как общее распространение [Crombie, 1984 г., Tjelta и др., 1990 г.].

РИСУНОК 6

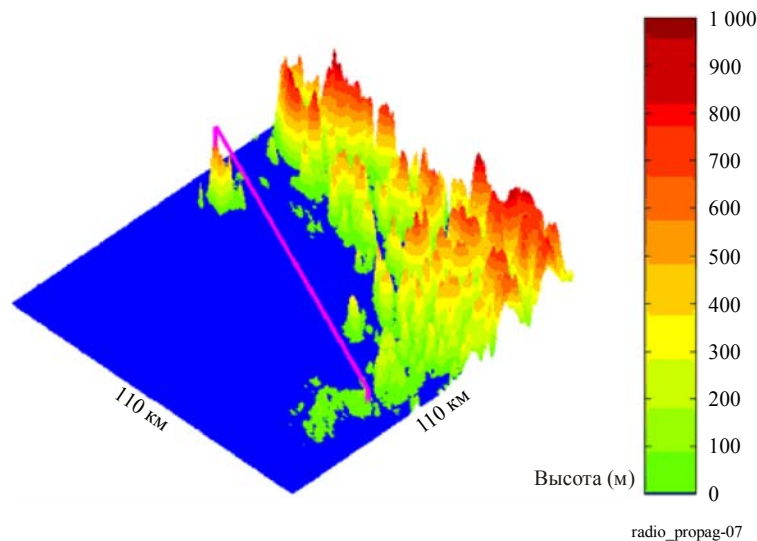
Отрицательный градиент рефракции в низших 65 м атмосферы, не превышающий 1% среднего года (см. Рекомендацию МСЭ-R P.453)



В методе наибольшей точности использовалась неровность поверхности рельефа и цифровые данные, требуемые для покрытия области 110 км x 110 км, где линия связи расположена в середине. Неровность поверхности  $s_a$  является просто стандартной девиацией всех высот в квадрате.

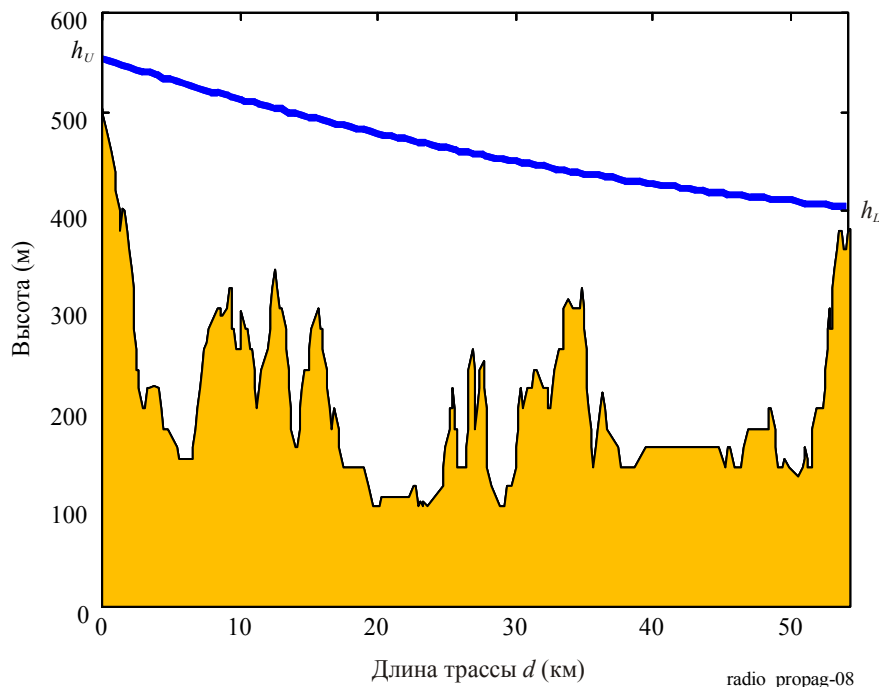
РИСУНОК 7

Пример площади на 110 км для вычисления неровностей рельефа поверхности  $s_a$



Упомянутые методы используют немного разные функции по отношению к переменным линии, таким как длина трассы  $d$ , угол наклона  $\epsilon_p$ , высота нижней антенны  $h_L$  и частота  $f$ . На Рисунке 8 показана плоская Земля, состоящая из профиля трассы с указанием длины трассы и высоты антенны, для того чтобы получить угол наклона с высотой нижней антенны и выделенной длиной трассы.

РИСУНОК 8  
Профиль трассы



Основная методика получения эмпирических уравнений в Методах 1 и 2 для процента времени  $p$  превышения глубины замирания  $A$  была создана с использованием техники анализа множественных регрессий по данным замираний для 47 линий связи в Северо-Западной Европе [Tjelta *и др.* 1990 г.]. Более поздний подход, использующий карты статистики градиента рефракции, является фактически обобщением международного опыта, основанным на подходе, который первоначально был разработан для Канады [Olsen и Segal, 1992 г.]. Основания для новых методов МСЭ-R и подробны анализ широко используемых региональных методов представлены в [Olsen и Tjelta, 1999 г. и Olsen *и др.*, 2003 г.]. Для получения геоклиматических коэффициентов в Методах 1 и 2 необходимы данные о градиенте рефракции, который был получен из числовых атмосферных данных [Tjelta *и др.*, 1998 г.]. Тот же самый пункт показывает последовательную регрессию и метод корреляции, приводящий к прогнозированию. Фактические коэффициенты, используемые в Рекомендации МСЭ-R P.530 взяты из входящих документов в МСЭ-R.

Эти методы теперь очень легко осуществить в программном обеспечении, поскольку они не откидывают пользователей с неавтоматизированной или субъективной оценкой по классификации. Очевидно, что ранние методы давали точные результаты для обученного пользователя, но более частое применение программного обеспечения, основанного на инструментах, делает более подходящим метод из Рекомендация МСЭ-R P.530.

### 5.1.1.3 Точность метода для хвоста распределения глубоких замираний

Длина трассы  $d$  и угол наклона  $\epsilon_p$  остаются серьезными предсказателями по той веской причине, что, чем длиннее линия, тем больше вероятность того, что они будут включены в структуру волновода. К тому же, чем сильнее наклон трассы, тем больше вероятность того, что она не будет подвергаться влиянию типичных горизонтально направленных волноводных структур. Это представляется возможным, если предсказателем выступает высота нижней антенны. Она указывает слои, основные на поверхности, как первую причину многолучевых замираний и улучшений. Чем ниже расположена антенна, тем большая вероятность того, что трасса пройдет по волноводам. Более проблематично найти объяснение термину частота, справедливо лишь будет сказать, что она довольно слабый предсказатель в уравнениях множественной регрессии. Но корреляция между переменными может скрывать такие зависимости, как прямая отрицательная корреляция между длиной трассы и частотой.



Общие стандартные отклонения погрешностей прогнозирования, используемых в Методах 1 и 2, составляют 5,7 дБ и 5,9 дБ, соответственно, включая вклад вследствие изменений от года к году. В широком диапазоне 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 общими стандартными отклонениями неточно отражает улучшение качества прогнозов, что наблюдается при использовании Метода 1 для линий над очень пересеченной местностью (например, горы) или над очень ровной местностью (например, надводные трассы). Например, стандартные отклонения погрешности для горных линий связи ( $h_L > 700$  м) уменьшаются на 0,6 дБ, а величины отдельных погрешностей для линий над высокогорными районами – на несколько децибелов.

Методы 1 и 2 получены из множественных регрессий по данным замираний для 251 линии в различных геоклиматических районах мира с учетом длины трассы  $d$  в диапазоне от 7,5 до 185 км, частот  $f$  в диапазоне от 450 МГц до 37 ГГц, угла наклона  $|\epsilon_P|$  до 37 мрад, высоты нижней антенны  $h_L$  в диапазоне от 17 до 2300 м, градиентов 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). Результаты полуэмпирического анализа показывают, что нижняя граница частотного диапазона действительно обратно пропорциональна длине трассы.

### 5.1.2 Основа и точность метода для неглубоких замираний

В методе, представленном в Рекомендации МСЭ-R P.530 для прогнозирования глубины замираний для различных процентов времени их превышения, комбинируется эмпирическая процедура интерполяции между областью глубоких замираний в функции распределения и 0 дБ с Методами 1 или 2, рассмотренными в предыдущем пункте. Метод был частично основан на соответствующих данных для трасс протяженностью 7–95 км и частотного диапазона 2–37 ГГц.

Однако он также может быть справедлив для более широких диапазонов, предложенных в Методах 1 и 2 в предыдущем пункте.

В Таблице I-2 используются все данные, доступные в базе данных МСЭ-R, т. е. все данные с необходимыми переменными для методов прогнозирования. В Таблице 1 обобщены результаты испытаний по методу прогнозирования из Рекомендации МСЭ-R P.530 для распределения многолучевых замираний за наихудший месяц, где по наблюдаемым данным замирания были меньше, чем 20 дБ. 10% времени все доступные данные замираний были меньше, чем 20 дБ, что составляет почти 1% всех уменьшений. Однако в 0,1% времени половина данных замираний за наихудший месяц была меньше, чем 20 дБ и лишь немного данных в 0,01% времени, и наконец, в 0,001% времени их не было. Испытания показывают умеренное снижение средних погрешностей и стандартных отклонений в 0,1% времени и выше.

ТАБЛИЦА 1

Наблюдения по отношению к данным замираний за наихудший месяц, которые были меньше, чем 20 дБ

Процент времени	Число наблюдений	Средняя погрешность (дБ)		Стандартное отклонение (дБ)	
		Метод 1	Метод 2	Метод 1	Метод 2
10	11	-1,0	-1,0	1,7	1,7
1	49	-1,2	-1,4	1,6	1,7
0,1	63	-0,2	-0,48	4,1	3,9
0,01	9	5,4	5,3	2,9	2,9

### 5.1.3 Основа и точность метода для диапазона улучшения

Метод улучшения основан на анализах доступных данных, которые находятся в [Tjelta и Tanem, 1992 г.]. Подход основан на допущении, атмосферные слои или структуры каналов, вызывающие глубокие замирания, также могут привести к серьезным улучшениям. Если линия связи в области показывает множество многолучевых замираний, это также покажет сильное улучшение. Используя скудные доступные данные, было сделано приближение, для того чтобы установить улучшение с хвостом многолучевых замираний. Кроме того, в соответствующей литературе найдены примеры, показывающие, что длинный конец наклона кривой улучшения распространения располагается выше 3,5 дБ на декаду. Предложены данные фиксированного наклона кривой от 10 дБ уровня улучшения и выше. В промежутке между 10 дБ и 0 дБ использовалась аналогичная процедура интерполяции, как в случае для многолучевых замираний.

Проценты в пределах от 90% до 99,999% соответствуют 10% превышаемого улучшения для 0,001% времени. Все используемые данные такие, для которых существует возможность прогнозирования.

ТАБЛИЦА 2

**Результаты наблюдений методов прогнозирования для наихудшего усиления**

Процент времени	Число наблюдений	Средняя погрешность (дБ)		Стандартное отклонение (дБ)	
		Метод 1	Метод 2	Метод 1	Метод 2
99,999	4	-0,8	-0,6	2,8	2,7
99,99	8	-0,2	-0,1	3,1	3,0
99,9	10	-0,9	-0,8	1,8	1,8
99	10	-0,6	-0,6	2,0	2,0
90	3	-1,4	-1,4	0,8	0,8

Результаты показывают низкое значение среднего и стандартного отклонения для обоих методов, но существует лишь немного доступных данных.

#### 5.1.4 Примеры применений

Местоположение: Афины, Греция

Широта: 38° 50' с. ш.

Долгота: 23° 40' в. д.

Частота:  $f = 6$  ГГц

Длина трассы:  $d = 60$  км

Высота передающей антенны:  $h_t = 45$  м

Высота приемной антенны:  $h_r = 30$  м.

*Шаг 1:* Для данного местоположения трассы значение точечного градиента рефракции ( $dN_1$ ) в самом нижнем 65-метровом слое атмосферы, не превышаемый в течение 1% среднего года составляет  $-594,75$  N-единиц/км. Для того чтобы получить этот результат нужно взять  $1,5^\circ$  по долготу и широте из Рекомендации МСЭ-R P.453.

*Шаг 2:* Затем вычисляется средний геоклиматический коэффициент  $K$  для наихудшего месяца. Для этого использовался быстрый расчет по следующему уравнению:

$$K = 10^{-4,2 - 0,0029 dN_1} = 0,00335. \quad (37)$$

*Шаг 3:* Использовались соответствующие упрощенные уравнения для вычисления коэффициента появления многолучевости:

$$p_0 = Kd^{3,0} (1 + |\epsilon_p|)^{-1,2} \times 10^{0,033f - 0,001 h_L} = 814,57\%, \quad (38)$$

где:

$h_e$  и  $h_r$ : высоты антенн (м) (над уровнем моря)

$|\epsilon_p| = |h_r - h_e| / d$

$h_L$ : широта нижней антенны.

*Шаг 4:* Глубина замираний  $A_t$ , при которой происходит переход от распределения глубоких замираний к распределению неглубоких замираний, вычисляется как:

$$A_t = 25 + 1,2 \log p_0 = 28,49 \quad \text{дБ}. \quad (39)$$

Шаг 5: В Таблице 3 показан процент времени  $p_w$ , в течение которого разное значение глубины замираний  $A$  (дБ) было превышено в течение среднего наихудшего месяца.

ТАБЛИЦА 3

## Процент превышений уровней глубоких замираний

Глубина замираний, $A$ (дБ)	Процент превышения, $p_w$ (%)
2	36,054
5	23,246
10	16,986
30	0,815

## 5.2 Статистика количества и длительности замираний

Планирование и проектирование радиорелейных систем основано на требованиях, касающихся готовности и производительности.

Неготовность определяется как передача сигнала с характеристиками ниже заданных параметров (для цифровой системы КОБ  $\geq 10^{-3}$ ) в течение более чем 10 секунд, и/или когда сигнал полностью прерван.

Поэтому для того чтобы прогнозировать вероятность того, что радиосистема станет неготовой, необходимо знать статистику о числе и длительности замираний.

Кроме того, эти статистические данные, касающиеся статистической оценки изменения замираний, очень важны для проектировщиков систем защитной коммутации для радиорелейных систем.

## 5.2.1 Процедуры оценки

Для глубины замираний  $A$ , больше чем 15 дБ, среднее число замираний в час  $N$  и средняя длительность замираний  $t$  на частоте  $f$  обычно оцениваются как:

$$N = C_1 10^{-\alpha_1 A f \beta_1} \quad (40)$$

и

$$t = C_1 10^{-\alpha_2 A f \beta_2} \quad (41)$$

ТАБЛИЦА 4

## Значения для уравнения (40), определенные экспериментально

Местоположение	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1 + \beta_2$	$C_1$	$C_1$
Франция	0,5	0,5	1,4	-1	0,4	-	-
Германия	0,67	0,33	-	-	-	$\sim 0,7^{(1)}$	-
Соединенные Штаты Америки	0,5	0,5	1,32	-0,50	0,82	-	$56,6 \sqrt{d}$
Швейцария	0,41	0,59	1,38	-1,38	0	-	-

<sup>(1)</sup> Основано на принятом значении для  $\beta_1$  из 1,4.

Хотя еще невозможно дать общий свод правил для параметров уравнений (40) и (41), значения, показанные в Таблице 4, были определены экспериментально несколькими администрациями для сухопутной трассы и могут использоваться для руководства.

### 5.2.2 Экспериментальная основа процедур оценки

Несколькими администрациями были проведены измерения числа и длительности замираний на частотах между 4 и 15 ГГц [Boithias, 1981 г.]. Уравнения (40) и (41) основаны на данных для сухопутной трассы, полученных во Франции [Boithias, 1981 г.], Германии [Stephansen и Mogensen, 1979 г.], Соединенных Штатах Америки [Lin, 1971 г.; Vigants, 1971 г.; Bullington, 1971 г. и Barnett, 1972 г.] и Швейцарии. Коэффициенты пропорциональности  $C_1$  и  $C_2$  зависят от периода рассмотрения, длины трассы, климата и т. д., однако до сих пор эти зависимости не точно известны. Существуют некоторые свидетельства того, что  $N$  (и, следовательно,  $C_1$ ) имеют тенденцию увеличиваться с увеличением длины трассы. Измерения, проведенные в бывшем СССР, позволяют предположить, что  $t$  уменьшается с увеличением длины и просвета трассы.

В каждом случае вышеупомянутой таблицы сумма экспонент  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  равна 1, поскольку выражение  $N \cdot t$  представляет собой общую длительность замираний, которая для быстрых замираний пропорциональна принимаемой мощности.

Распространение длительности замираний, для которых среднее значение определяется уравнением (41) подчиняется следующему нормальному логарифмическому закону [Boithias, 1981 г.]. Для того чтобы уменьшить стандартное отклонение длительности замираний и глубину замираний на частоте от 13,5 до 15 ГГц, а также немного увеличить частоту, было проведено исследование. [Nadenenko и Sviatogor, 1972 г. и Stephansen и Mogensen, 1979 г.]. Это делается для того, чтобы показать только небольшую зависимость от геометрических характеристик трассы и климатических условий [Nadenenko и Sviatogor, 1972 г.].

Наблюдалось, что над достаточно плоской траекторией с увеличением просвета трассы число замираний, обусловленных многолучевостью, растет. Было найдено, что на прибрежных трассах число замираний существенно выше, чем на трассах, удаленных от моря. Например, было найдено, что число измеренных замираний, обусловленных многолучевостью, на надводных трассах в пятьдесят раз выше, чем на сухопутных трассах с плоской траекторией в близости точки отражения от земной поверхности [Nadenenko и Sviatogor, 1972 г.].

Измерения на 22-километровой надводной трассе от Западного побережья Франции показали уменьшение среднего значения длительности замираний, так же как и стандартного отклонения, при уменьшении частоты с 2 до 15 ГГц.

### 5.3 Скорость изменения уровня сигнала

Скорость изменения уровня сигнала была измерена одним из двух следующих способов: или как изменение уровня сигнала в течение определенного интервала времени, или как временной интервал, связанный с малыми изменениями в уровне. В общем, немногие экспериментальные данные показали, что эта скорость увеличивается с частотой и глубиной замираний (в соответствии с течением  $t$  в уравнении (41)) и с увеличением длины трассы.

Измерения, проводимые в течение одного года во Франции на сухопутной 53-километровой линии связи на частоте 13 ГГц, показали, что скорость изменений уровня сигнала имеет логарифмически нормальное распределение с тем же самым стандартным отклонением для средней глубины замираний 20 и 30 дБ выше интервалов в 10 дБ. Медианное значение составило 5 дБ/с при 20 дБ и 20 дБ/с при 30 дБ. Отношение скорости изменений к интервалу стандартного отклонения составило 5,4 [Derrennes, 1979 г.].

Также во Франции на 53-километровой сухопутной трассе было замечено, что скорость изменений уровня сигнала на четырех фиксированных частотах между 11,25 ГГц и 11,65 ГГц имела приблизительно логарифмически нормальное распределение для глубины замираний более 12 дБ. Скорость изменений, превышаемая в 0,1% случаев, была выше 100 дБ/с. Отношение скорости изменений к интервалу стандартного отклонения составило приблизительно 2,7 [Martin, 1983 г.].

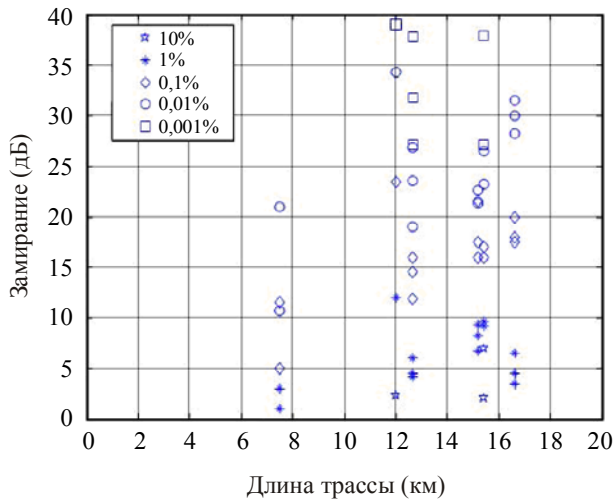
На надводных трассах бывшего СССР скорость изменений составила 5 дБ/с на частоте 2 ГГц, и скорость выше 100 дБ/с, наблюдаемая на частоте 15 ГГц, была измерена с интервалом в 10 дБ [Gavzilina и др., 1986 г.].

### 5.4 Короткие трассы

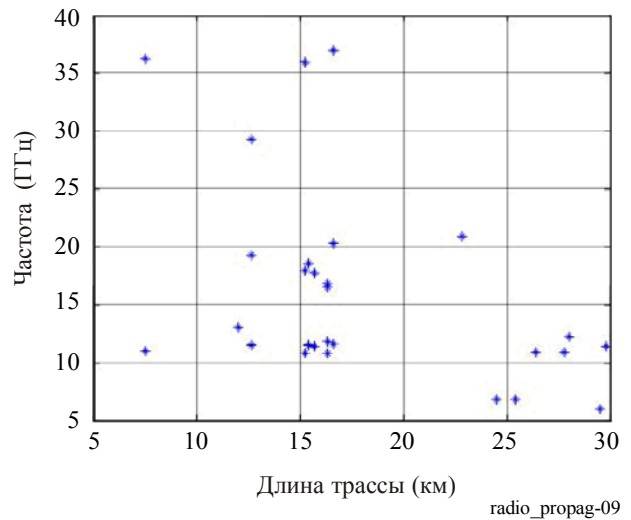
Данные измерений показывают существенные замирания даже на трассах не более 10 км, но данных о многолучевости на трассах короче 7 км не поступало. На Рисунке 9а) отмечено, что приблизительно на 7 км данные показывают 20 дБ замираний в течение 0,01% времени. Создается впечатление, что здесь могли бы появиться данные о многолучевых замираниях даже на более коротких трассах. С другой стороны, для очень коротких трасс, механизмы канализации, похоже, не создают глубоких замираний.

РИСУНОК 9

а) Данные измерений, иллюстрирующие замирания от 10% до 0,001% для трасс протяженностью менее 20 км



б) Диаграмма разброса частоты на трассе



### 5.5 Короткие периоды времени

Методы прогнозирования для замираний и улучшения из-за многолучевости и связанных с ними механизмов приводятся в Рекомендации МСЭ-R P.530, они основаны на статистических данных долгосрочных измерений распространения и достаточны для планирования радиорелейных линий связи прямой видимости.

Однако методы прогнозирования надежности и показателей работы за короткие интервалы времени из Рекомендации МСЭ-R F.1330 важны, особенно для приведения системы в эксплуатацию. В Рекомендации МСЭ-R P.530, приведено только общее руководство по данному вопросу, это информация, касающаяся измерений кратковременных замираний, которая ограничена особенностями регионов мира.

Самые подробные исследования проводились в диапазоне частот 3,7–8 ГГц на 25 радиорелейных пролетах длиной от 36,3 до 166,3 км, расположенных в различных климатических районах в центральном, северо-западном и южном регионах Европейской части России, Балтийского побережья, Украины, Белоруссии, Крыма и Черноморского побережья на Кавказе [Minkin и Nadenenko, 1998 г.]. Статистические данные замираний за короткие периоды времени (15 мин., 1 час., 3 час., 6 час., 1 день, 4 дня и 7 дней) были получены в процессе непрерывной круглосуточной регистрации уровня сигнала в течение летних месяцев. В общей сложности были обработаны экспериментальные данные, собранные за короткие периоды испытаний, составившие в общей сложности 23 000 часов.

Основываясь на этих результатах, для конкретных регионов мира были предложены следующие эмпирические уравнения для преобразования распределения замираний за наихудший месяц за короткие периоды времени.

Для сравнительно плоских трасс:

$$p_{sw} = p_w \cdot (89,34T^{-0,854} + 0,676) \% \quad \text{для } 1 \text{ час.} \leq T \leq 720 \text{ час.} \quad (42)$$

Для холмистых прибрежных трасс:

$$p_{sw} = p_w \cdot (119T^{-0,78} + 0,295) \% \quad \text{для } 1 \text{ час.} \leq T \leq 720 \text{ час.} \quad (43)$$

Для холмистых трасс:

$$p_{sw} = p_w \cdot (119,85T^{-0,834} + 0,175) \% \quad \text{для } 1 \text{ час.} \leq T \leq 720 \text{ час.} \quad (44)$$

## 5.6 Спаренные линии

Как в случае ослабления в дожде корреляция между глубиной замираний на отдельных пролетах спаренных линий связи обычно считается незначительной. Вероятность полного перерыва в работе спаренных линий будет тогда равняться сумме вероятностей перерывов в работе отдельных линий:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (45)$$

где  $P_i$  – вероятность перерывов в работе для  $i$ -ом пролете линии, состоящей из  $n$  пролетов.

В измерениях, сделанных в Японии для пяти последовательных линий, вероятность одновременного возникновения глубоких замираний для двух последовательных линий была всегда на меньше 10%, чем для каждой отдельной линии. Измерения, сделанные в 18 парах смежных пролетов в Бразилии [Silva Mello и др., 2005 г.], показали, что в тропическом и экваториальном климатах может наблюдаться большая корреляция. Результаты показали сильную корреляцию между значением ослабления общего распространения и небольшим значением ослабления в распространении отдельных линий для того же процента времени.

## 6 Искажения, обусловленные распространением

Главной причиной искажения на линиях прямой видимости в УВЧ и СВЧ диапазонах является частотная зависимость амплитуды и группового времени запаздывания в условиях многолучевого распространения в свободном пространстве. Такое искажение, которое обычно называется частотно-избирательными замираниями, усиливается с ростом полосы пропускания системы и зависит от амплитуды и относительной задержки передачи между передатчиком и приемником на отдельных трассах. Искажения, обусловленные многолучевостью, скорее всего, будет ограничивающим фактором для цифровых радиолиний высокой пропускной способности, работающих на частотах ниже 15 ГГц. На более высоких частотах должны учитываться также искажения, обусловленные многолучевостью. Однако следует учитывать, что обычно воздействие атмосферных осадков гораздо выше. В настоящей главе описываются как эти воздействия, так и модели каналов для определения производительности системы из-за частотно-избирательного замирания. Для противодействия этим эффектам должны использоваться методы, описанные в настоящем Справочнике.

### 6.1 Модели многолучевого распространения

Метод предсказания производительности из-за многолучевого распространения (МР) состоит из:

- модели МР,
- модели статистической случая МР,
- модели того, как оборудование может сопротивляться МР.

Многолучевое распространение обычно описывается в виде двух или более отдельных лучей, полученных из-за амплитуды и задержки, и объединенных в приемнике. Количество лучей иногда может быть большим, но глубокие замирания происходит, когда два луча соизмеримой амплитуды губительно добавляются. Вполне допустимо, что глубокие замирания (и частотно-избирательные замирания) обычно вызываются одним единственным лучом, приходящим с заметной задержкой и добавленным к другим лучам, которые пришли раньше.

Комплексная функция передачи радиоканала для физической многолучевой модели выглядит так:

$$H(\omega) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-j(\omega T_i + \phi_i)}, \quad (46)$$

где:

$$\omega = 2\pi f$$

$A_i, T_i$  и  $\phi_i$ : амплитуда, задержка и фаза  $i$ -го луча, соответственно.

Для отражения радиоканала с ограниченной полосой (40–100 МГц) можно применять более простые математические модели. Эти модели могут классифицироваться как *полиномиальные* или *гипотетические* лучевые модели.

### 6.1.1 Гипотетические лучевые модели

Функция многолучевой передачи также может выражаться при помощи различных моделей с ограниченным количеством лучей. Такие модели не являются физическими из-за упрощений, подразумеваемых в выражении функции передачи. Поэтому они называются моделями гипотетических лучей.

Упрощенная трехлучевая модель, также называемая моделью Рамлера [Rummler, 1978 г.], выглядит так:

$$H(\omega) = a \left( 1 - b e^{\pm j(\omega - \omega_M)\tau_f} \right). \quad (47)$$

Эта модель имеет четыре параметра;  $a$  и  $b$  являются коэффициентами, относящимися к амплитуде и форме избирательного ослабления соответственно,  $\tau$  – задержка второго гипотетического луча, а  $\omega$  это угловая частота максимальной глубины замириания. Количество параметров часто сокращается до трех, из-за присвоения задержке фиксированного значения, обычно  $\tau = 6,3$  нс.

Если количество параметров сведено к двум,  $b$  и  $\omega$ , установив  $a = 1$ , модель называется нормализованной двухлучевой моделью.

### 6.1.2 Полиномиальные модели

И реальные, и комплексные многочлены могут применяться для выражения функции передачи. Многочленное выражение амплитуды и группового времени запаздывания является функцией частоты с общим видом:

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^N C_k \omega^k, \quad (48)$$

где коэффициенты  $C_k$  могут быть реальными или комплексными.

### 6.1.3 Параметрические модели

Другой подход состоит в описании искажений в радиоканале при помощи параметрического выражения разницы амплитуд. Разница амплитуд на двух отдельных частотах используется для характеристик искажения амплитуды. Этот метод в целом называется методом линейного амплитудного искажения (LAD). Также могут применяться две фиксированные частоты, предпочтительно на равном расстоянии от центра радиоканала, т. е. внутриполосное амплитудное искажение (IBAD). В качестве альтернативы две частоты могут соответствовать точкам максимальной и минимальной глубины замирианий на уровне свободного распространения, определяя искажение мощности внутри полосы (IBPD).

## 6.2 Расчет качественных показателей

Традиционный метод расчета времени перерыва связи для аналоговых систем основан на концепции замириания в одной частоте и потому напрямую неприменим к цифровым системам радиотрасс высокой пропускной способности. Расширение рамок замириания, которые в аналоговых системах будут иметь склонность к снижению воздействия теплового шума, не улучшит производительность цифровых систем, если частотно-избирательные замириания уже свернуло амплитуду глазковой диаграммы до нуля.

Для применения моделей распространения в расчетах производительности для цифровых систем высокой пропускной способности необходимо иметь статистические описания того, как все различные параметры работают во время многолучевых замирианий. Этот вопрос можно разделить на две части: характеристику природы произвольных флуктуаций в модели функции многолучевой передачи, в идеале, как многомерное совместное возможное распространение; изложение способа, в котором параметры этого распространения зависят от физических свойств радиоканала, например, длины трассы, радиочастоты, отклонения трассы, климата и т. д.

Будучи объединено со статистикой для возможности возникновения замириания, это позволит безусловное совместное возможное распространение для параметров, определяющих поведение системы. Полный набор параметров для многолучевой модели может рассматриваться, как размеры многомерной поверхности. Перерыв в работе появляется, когда эти параметры находятся в определенной критической области многомерной поверхности.

Перерыв в работе цифровой радиосистемы может быть предсказан при помощи разных методов, например:

- метод запасов на замириания;
- метод кривой сигнатуры;
- метод, использующий статистику LAD.

### 6.2.1 Метод кривой сигнатуры

Метод кривой сигнатуры – не единственный метод, так как существует множество разных подходов. В этой главе приведены основные принципы метода и несколько примеров решений. Более подробно он описан в Справочнике МСЭ-R "Цифровые радиорелейные системы".

Вероятность перерыва связи ( $КОБ > 10^{-3}$ ), вызванного многолучевым замирианием ( $P$ ), может быть рассчитана из вероятности перерыва связи из-за частотно-избирательного замириания ( $P_s$ ) и вероятности перерыва связи из-за теплового шума ( $P_f$ ) при помощи следующего уравнения:

$$P = \left( P_f^{\alpha/2} + P_s^{\alpha/2} \right)^{2/\alpha}. \quad (49)$$

$P_f$  может быть вычислено, как указано в Рекомендации МСЭ-R P.530.

Вероятность перерыва связи из-за частотно-избирательных замираний определяется произведением вероятности многолучевых замираний  $\eta$  и вероятности перерыва связи, полученного при межсимвольных помехах во время многолучевых замираний:

$$P_S = \eta \cdot (P_S|_{MP}). \quad (50)$$

Вероятность многолучевых замираний  $\eta$  может быть связана с фактором возникновения глубоких замираний  $P_0$  или с параметрами статистического распределения параллельного медленных замираний. Одно из предложенных уравнений имеет вид:

$$\eta = 1 - e^{-0.2 P_0^{3/4}}. \quad (51)$$

Последнее слагаемое может быть основано на упрощенной трехлучевой модели или на двухлучевой модели. Вероятность перерыва связи определяется путем интегрирования функции распределения общей плотности случайных переменных, определенных моделью канала по критической области пространства вероятности. При вычислении следует предположить вероятное распределение для различных параметров, например относительная задержка эхо  $\tau$ , относительная амплитуда эхо-сигнала  $k$  и частота режекции  $\phi_0$ . Обычно перерыв связи описывается с применением следующего уравнения:

$$P_S|_{MP} = \int_0^{\infty} p(\tau) d\tau \int_{-1/2\pi}^{1/2\pi} \phi_0 d\phi \int_D p(k) dk, \quad (52)$$

где  $D$  – область перерыва связи, определенная сигнатурами минимальной и максимальной фазы. Если используются приближительные сигнатуры, результат интегрирования можно выразить следующей формулой:

$$P_S|_{MP} = \frac{C \cdot W \cdot \lambda_a \cdot \{\tau^2\} \cdot P_b(1)}{\tau_r}, \quad (53)$$

где:

- $C$ : постоянный коэффициент,
- $W$ : ширина сигнатуры (МГц),
- $\lambda_a$ : средняя критическая высота сигнатуры,
- $\tau_r$ : эталонная задержка для  $\lambda_a$  (нс),
- $P_b(1)$ : значение функции вероятности плотности, соответствующее амплитуде  $b = 1$ ,
- $\{\tau^2\}$ : момент второго порядка распределения связанной с эхом задержки ( $= 2\tau_m^2$ ) для быстрорастущего распределения и  $= \mu^2 + \nu^2$  (для Гауссовского распределения),
- $\tau_m$ : средняя задержка для трассы, которая связана с длиной трассы и диаграммой направленности антенны.



Для функции распределения вероятности амплитуды отраженного сигнала  $P_b(b)$  были предложены различные допущения: единообразное, экспоненциальное [Saleh и Valenzuela, 1987 г.], Weibull [Salous и Vajj, 1998 г.], и Рэлеевское-по-Рэлеевскому [Shafi, 1987 г.] функции распределения плотности вероятности минимума частоты  $P_{f_0}(f_0)$  является равномерной.

Для  $p(\tau)$  подразумеваются два разных вида распределения задержки отраженного сигнала. В первом случае задержка эхо  $\tau$  имеет отрицательное экспоненциальное распределение со средним значением  $\tau_m$ , которое зависит от длины трассы. Следующее эмпирическое соотношение между  $\tau_m$  (нс) и  $d$  (км) применяется для трасс без сильного отражения от поверхности:

$$\tau_m = \tau_{m0} \cdot \left( \frac{d}{50} \right)^n, \quad (54)$$

где значение  $n$  находится в диапазоне от 1,3 до 1,5, а  $\tau_{m0}$  является средней относительной задержкой для стандартного трассы в 50 км.

Во втором случае подразумевается Гауссовское распределение со средним  $\mu$  и переменным  $v^2$ . Эти параметры могут выбираться независимо, позволяя более точную подгонку к измеряемым (или рассчитываемым) функциям плотности для отдельных интервалов, которые позволяет единственный параметр экспоненциальной плотности. В отсутствие любой информации, относящейся к интервалам, модель подразумевает:

$$\mu = 0,70 (d/50) \text{ нс}, \quad (55)$$

$$v^2 = 0,49 (d/50) \text{ нс}^2. \quad (56)$$

Гауссовское распределение включает в себя и положительную и отрицательную задержку.

Приближенное значение для перерыва связи из-за частотно-избирательного замирания можно получить при помощи прямоугольной аппроксимации для сигнатуры. В таком случае может быть использовано следующее уравнение:

$$P_{S|MP} = \frac{C \cdot W \cdot 10^{-B/20} \cdot \tau_m}{\tau_r}, \quad (57)$$

где:

- $B$ : глубина сигнатуры,
- $W$ : ширина сигнатуры,
- $C$ : константа,
- $\tau_r$ : эталонная задержка сигнатуры,
- $\tau_m$ : средняя задержка.

Расчеты следует производить, исходя из относительной частоты минимальной фазы и условий не минимальной фазы, и рассчитывая вероятность перерыва связи отдельно, когда сигнатуры для минимальной и не минимальной фаз различаются.

#### **Пример вычислений:**

Место: Пекин, Китай

Широта: 39° 55' с. ш.

Долгота: 116° 25' в. д.

Частота:  $f = 2$  ГГц

Длина трассы:  $d = 80$  км

Высота передающей антенны:  $h_t = 100$  м

Высота антенны приемника:  $h_r = 55$  м.

Шаг 1: Рассчитать среднее время задержки по формуле:

$$\tau_m = 0,7 \left( \frac{d}{50} \right)^{1,3} = 1,29 \text{ нс.} \quad (58)$$

Шаг 2: Необходимо рассчитать параметр многолучевой активности  $\eta$  (см. п. 7.2.2). Значение  $\eta$  является функцией  $p_w$  и, в этом случае,  $\eta = 0,267$ .

Шаг 3: Предположим, что формат модуляции имеет вид 8-PSK. Согласно Рекомендации МСЭ-R F.1093, стандартный параметр системы для этой определенной модуляции равен  $K_n = 7$ . Следует заметить, что  $K_n$  зависит от ширины и глубины сигнатуры, а также от эталонной задержки.

Шаг 4: Предполагая, что используется тот же стандартный параметр системы для замираний минимальной фазы и не минимальной фазы, получаем  $K_{n,M} = K_{n,NM} = 7$  и значение  $T = 105$  нс для периода бода (соответствует обычной скорости передачи в битах), вероятность избирательного перерыва связи можно рассчитать по формуле:

$$P_s = 2,15 \eta (K_{n,M} + K_{n,NM}) \frac{\tau_m^2}{T^2} = 0,0012. \quad (59)$$

### 6.2.2 Методы запасов на замирания

Применение запасов на замирания, как характеристик системы, происходит из закона замирания для многолучевых замираний на отдельной частоте. Заменяя чистые запасы на замирания (или эффективные запасы на замирания) для запасов на плоские замирания, перерыв связи на пролете можно рассчитать при помощи уравнения (15) или (28) из Рекомендации МСЭ-R P.530. Чистые запасы на замирания определяются, как глубина замирания на отдельной частоте, расширенные для того же количества секунд, в качестве порогового коэффициента ошибок, например, для  $10^{-3}$ .

Другой подход для метода запасов на замирания вычисляет рассеивание замирания при помощи коэффициентов рассеивания. В этом методе чистые запасы на замирания рассматриваются, как комбинация воздействия теплового шума, межсимвольных помех из-за многолучевого рассеивания и помех. Одним из способов получения этого является определение дисперсионных границ замираний радиосигнала в тракте с известным коэффициентом рассеивания  $DR_0$ . Это значение взято в качестве эталона дисперсионных границ замираний (DFMR). Затем дисперсионные границы замираний, которые должны быть измерены или предсказаны в тракте с коэффициентом рассеивания, выражаются в виде:

$$DFM = DFMR - 10 \log (DR/DR_0) \quad (60)$$

$DR$  выражается в виде уравнения:

$$DR = \frac{T_{IBPD}}{T_{SFF} \cdot (BF)^2}, \quad (61)$$

где:

$T_{IBPD}$ : количество времени, которое превышает значение выбранной разницы внутриполосной мощности (IBPD),

$T_{SFF}$ : количество времени, которое превышает значение выбранного замирания отдельной частоты (SFF),

$BF$ : коэффициент коррекции полосы пропускания, который является коэффициентом 22 МГц для полосы пропускания измерения.

### 6.2.3 Метод, использующий статистические данные линейной амплитудной дисперсии (LAD)

Рассеивание распространения включает в себя как амплитудную дисперсию, так и дисперсию задержки. Искажение, вызванное двумя замираниями трассы, имеет комплексную форму и не может напрямую полностью быть сформировано LAD. Тем не менее, LAD играет главную роль. Воздействие других искажений, например искажение задержки и искажение амплитуды большего уровня перерыва связи, описываются точно и надлежащим образом пороговой LAD. Это означает, что возможность перерыва связи, вызванная частотно-избирательным замиранием, может быть рассчитана, если дан эквивалент LAD и известна частота LAD.

Для каждой трассы совокупное распределение внутриполосной дисперсии амплитуды (IBAD) для полосы пропускания канала может быть определено при помощи экспериментальных результатов или при помощи описанного здесь метода вычисления [Martin и др., 1993 г.].

Зная, что функция автокорреляции  $\rho$  глубины замирания на двух фиксированных частотах в основном зависит от отражений от земли, можно рассчитать совокупное распределение IBAD для полосы пропускания канала на определенной трассе. Время перерыва связи в течение определенного периода будет зависеть от  $D_c$ , превышение коэффициента отношения носителя к шуму  $C/N$  сверх границ плавного замирания MB, и на  $S$ , значение IBAD статистически относится к  $D_c$ .

Без цифрового выравнивания уравнение для расчета значения  $S$  IBAD, принимая КОБ, равный  $10^{-3}$ , для разных значений  $D_c$  и для разных типов модуляции, выглядит следующим образом:

$$S = C_0^2 \left[ 1 - \frac{1}{(1 + D_C^{1/15})^n} \right] \cdot F^{0,2}, \quad (62)$$

где:

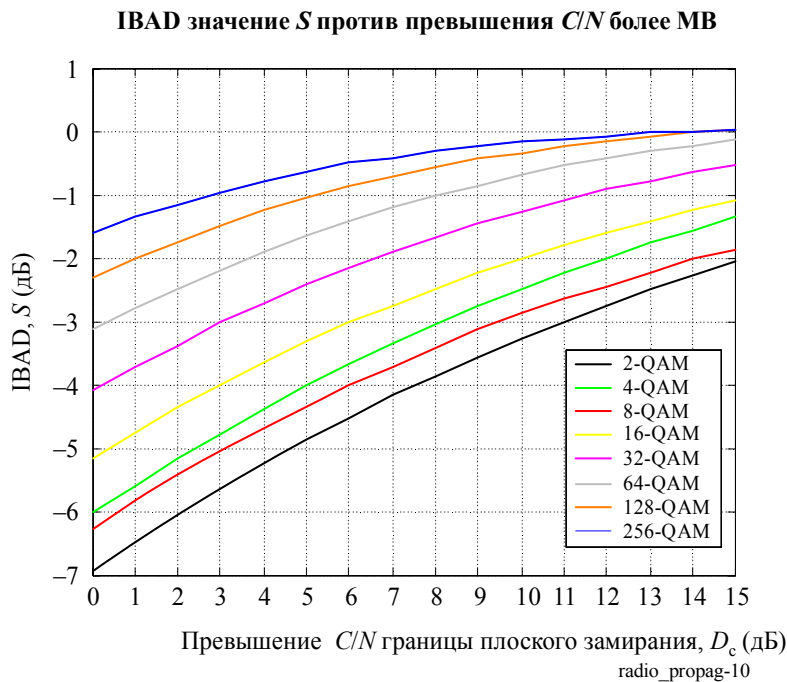
$$n = \frac{\sqrt{N}}{10} \quad (63)$$

$$\log C_0^2 = -0,74 \log(N) + 1,91 \quad (64)$$

$F = 9 - N$  с  $F = 1$ , если  $F < 1$ .  $N$  это количество уровней модуляции.

Например, на Рисунке 10 показана вышеописанная процедура для расчета значения  $S$  IBAD по отношению к превышению  $C/N$  MB для различных уровней модуляции  $N$ .

РИСУНОК 10



Когда используется уравнение домена линейного времени, значение  $S_E$  IBAD, принимая КОБ, равный  $10^{-3}$ , вычисляется из значения  $S$  без выравнивания, при помощи следующего уравнения:

$$S_E = S * k_E, \quad (65)$$

где:

$$k_E = k + 2,46/N \quad (66)$$

и

$$\log k = 0,6636 \log N - 0,577. \quad (67)$$

Это уравнение действует для значений до 256-QAM.

Точное значение времени перерыва связи может быть получено при помощи процесса повторяющегося вычисления, подстраивая значение  $S$ , полученное при помощи уравнения, приведенного выше, к значению  $S$ , полученному при помощи кривой равновероятности  $S$  и глубин замирания  $F$ , полученных при помощи функции автокорреляции  $\rho$ , характеризующей радиотракт.

## 7 Уменьшение кроссполяризационной избирательности

Для увеличения пропускной способности канала без расширения полосы пропускания может независимо использоваться ортогональная поляризация (или линейная или круговая) для передачи в том же частотном канале по тому же тракту. Однако эта технология может быть повреждена возможностью того, что при распространении в атмосфере некоторая мощность, передаваемая через одну поляризацию, может быть передана ортогональной поляризацией, тем самым вызывая внутриканальные помехи в системах повторного использования частоты. На меньших расстояниях это воздействие может также вызвать помехи в соседних каналах в системах с чередованием частот. Когда два сигнала с одним и тем же уровнем передаются на ортогональных поляризациях  $a$  и  $b$ , отношение полученного по основной поляризации сигнала ( $ac$  или  $bc$ ) к сигналу, полученному по кроссполяризации ( $bx$  или  $ax$ ), в этом сигнале известно, как поляризационная развязка (XPI) и часто используется при создании систем. Эти отношения  $ac/bx$  и  $bc/ax$  не обязательно одинаковы. С другой стороны, эксперименты с распространением обычно дают результаты измерений кроссполяризационной избирательности (XPD), которые являются отношением  $ac/ax$ , когда передается только поляризация  $a$ . То есть, сигнал с основной поляризацией  $ac$  и кроссполяризованный сигнал  $ax$  измеряются независимо друг от друга и в отсутствие любого ортогонально поляризованного сигнала  $b$ . Из-за характеристик диаграммы направленности антенны в обоих терминалах, кроссполяризованная составляющая будет существовать в полученном сигнале даже в условиях обычного распространения в стандартной атмосфере. Соответствующий XPD может существенно ухудшиться из-за дождя и гидрометеоров, отличных от дождя, а также во время периодов многолучевого распространения. В этой главе присутствует основа для методов прогнозирования, приведенная в Рекомендации МСЭ-R P.530, для расчетов уменьшения XPD как в условиях ясной погоды, так и в условиях дождя. Хотя, как говорилось выше, они концептуально отличаются, XPI и XPD могут считаться одинаковыми для практического применения [Oguchi, 1973 г.].

### 7.1 Модель канала

Обсуждение, предпринимаемое в следующих параграфах, следует из подхода, изложенного в Окончательном отчете COST 235 [COST, 1996 г.].

Развитие радиорелейных систем с повторным использованием частот ортогональной поляризации потребовало расширения модели канала распространения, для того чтобы принять во внимание характеристики передачи в атмосфере в обеих плоскостях поляризации. В данном разделе был принят основной подход, для того чтобы рассмотреть все возможные влияния (и поляризации и антенн), и как следующий шаг, сохранения важных компонентов, поэтому распространение явления деполяризации представляется в виде коэффициента XPD.

Матрица передачи  $M$  может определяться антеннами и атмосферой (между двумя антеннами) раздельно. Для составления матрицы требуется принять некоторые начальные условия.

Если  $E_0$  это напряженность поля приемника и  $E_i$  передатчика, то существует возможность выразить эти величины однострочковой матрицей, состоящей из вертикальной (V) и горизонтальной (H) компонент поля:

$$E_0 = \begin{bmatrix} E_{H0} \\ E_{V0} \end{bmatrix}, \quad E_i = \begin{bmatrix} E_{Hi} \\ E_{Vi} \end{bmatrix}. \quad (68)$$

Влияние передающей и приемной антенн представлено их основной и кроссполяризационной диаграммами направленности в плоскостях V и H, обозначенных соответственно  $g_{V,H}$  и  $x_{V,H}$ :

$$T = \begin{bmatrix} g_{TV} & x_{TV} \\ x_{TH} & g_{TH} \end{bmatrix}, \quad (69)$$

$$R = \begin{bmatrix} g_{RV} & x_{RV} \\ x_{RH} & g_{RH} \end{bmatrix}.$$

Средняя матрица передачи распространения может быть написана как:

$$S = \begin{bmatrix} S_{VV} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{HH} \end{bmatrix}. \quad (70)$$

Матрица передачи M может быть получена из следующего матричного уравнения:

$$E_0 = R \cdot S \cdot T \cdot E_i = M \cdot E_i. \quad (71)$$

Написав матрицу передачи в явном виде, получаем:

$$M = \begin{bmatrix} M_{VV} & M_{VH} \\ M_{HV} & M_{HH} \end{bmatrix}. \quad (72)$$

Выражение для каждой составляющей может быть найдено из уравнений (74):

$$\begin{aligned} M_{VV} &= g_{RV} \cdot S_{VV} \cdot g_{TV}, \\ M_{VH} &= g_{RV} \cdot S_{VV} \cdot x_{TV} + g_{RV} \cdot S_{VH} \cdot g_{TH} + x_{RV} \cdot S_{HH} \cdot g_{TH}, \\ M_{HV} &= x_{RH} \cdot S_{VV} \cdot g_{TV} + g_{RH} \cdot S_{HV} \cdot g_{TV} + g_{RH} \cdot S_{HH} \cdot x_{TH}, \\ M_{HH} &= g_{RH} \cdot S_{HH} \cdot g_{TH}. \end{aligned} \quad (73)$$

Здесь были опущены выражения, в которых содержится, по меньшей мере, два или три элемента из диагонали, потому что основные кроссполяризационные выражения значительно меньше, чем прямые.

Принимаемое поле для обеих поляризаций может быть получено из уравнений:

$$\begin{aligned} E_{V0} &= M_{VV} \cdot E_{Vi} + M_{VH} \cdot E_{Hi}, \\ E_{H0} &= M_{HV} \cdot E_{Vi} + M_{HH} \cdot E_{Hi}. \end{aligned} \quad (74)$$

Кроссполяризационная избирательность дается в соответствии с обычным определением:

$$\begin{aligned} XPD_V &= -20 \log \left[ \frac{E_{H0}}{E_{V0}} \right]_{E_{Hi}=0} = -20 \log \left( \frac{M_{HV}}{M_{VV}} \right) \\ XPD_H &= -20 \log \left[ \frac{E_{V0}}{E_{H0}} \right]_{E_{Vi}=0} = -20 \log \left( \frac{M_{VH}}{M_{HH}} \right). \end{aligned} \quad (75)$$

Тогда как кроссполяризационная развязка канала:

$$\begin{aligned} XPI_V &= -20 \log \left( \frac{M_{VH}}{M_{VV}} \right)_{E_{Hi}=E_{Vi}}, \\ XPI_H &= -20 \log \left( \frac{M_{HV}}{M_{HH}} \right)_{E_{Hi}=E_{Vi}}. \end{aligned} \quad (76)$$

Обычно, вполне удовлетворяются следующие выражения [Olsen, 1981 г.]:

$$\begin{aligned} XPD_V &\cong XPI_V, \\ XPD_H &\cong XPI_H. \end{aligned} \quad (77)$$

### 7.1.1 Номинальное принимаемое поле

В случае номинального принимаемого поля распространение заключается в следующем:

$$\begin{aligned} S_{VV} &= S_{HH} = 1, \\ S_{VH} &= S_{HV} = 0. \end{aligned} \quad (78)$$

В целях упрощения принимается, что антенны имеют одинаковые диаграммы направленности в плоскостях  $H$  и  $V$ , поэтому их диаграммы направленности по основной поляризации и по кроссполяризации в плоскостях  $V$  и  $H$  одинаковые и обозначены  $g_{TR}$  и  $x_{TR}$ .

В результате развязка имеет вид:

$$XPI = -20 \log \left( \frac{x_R}{g_R} + \frac{x_T}{g_T} \right). \quad (79)$$

Свойства избирательности антенн при влиянии основной и кроссполяризационной диаграммами направленности:

$$\begin{aligned} X_{RN} &= -20 \log \left( \frac{x_R}{g_R} \right) \\ X_{TN} &= -20 \log \left( \frac{x_T}{g_T} \right), \end{aligned} \quad (80)$$

Как правило, в типичных применениях антенны указывают линию прямой видимости, которая подразумевает  $g_T = g_R = 1$ . Принимая это во внимание, уравнение (80) станет:

$$\begin{aligned} X_{RN} &= -20 \log (x_R) \\ X_{TN} &= -20 \log (x_T), \end{aligned} \quad (81)$$

Решив уравнение для  $x_{R,T}$  и подставив результаты в уравнение (79), получаем следующее уравнение:

$$XPI = -20 \log \left( 10^{-\frac{X_{RN}}{20}} + 10^{-\frac{X_{TN}}{20}} \right). \quad (82)$$

Данный результат не включает дополнительные эффекты распространения радиоволн и должен использоваться для установки оборудования номинально.

### 7.1.2 XPI при распространении (однолучевый подход)

Элементы матрицы передачи распространения в этом случае (нет частотно-избирательных замираний):

$$\begin{aligned} S_{VV} &= l_V \exp(-j\phi_V), \\ S_{HH} &= l_H \exp(-j\phi_H), \\ S_{VH} &= d_V \exp(-j\gamma_V), \\ S_{HV} &= d_H \exp(-j\gamma_H), \end{aligned} \quad (83)$$

где:

- $l$  и  $\phi$ : дополнительное ослабление и сдвиг фазы в основном канале,
- $d$  и  $\gamma$ : ослабление и сдвиг фазы в кроссполяризованном канале.

Используя уравнение (76) и вышеупомянутое предположение, что антенны имеют одинаковые диаграммы направленности в плоскостях  $H$  и  $V$  развязка имеет вид:

$$XPI = -20 \log \left[ \frac{g_T x_R + x_T g_R (l_H / l_V) \exp[-j(\varphi_H - \varphi_V)]}{g_T g_R} + \frac{d_H}{l_V} \exp[-j(\gamma_H - \varphi_V)] \right]. \quad (84)$$

Уравнение, приведенное выше, может использоваться для моделирования в условиях ясного неба и дождя.

### 7.1.2.1 Условия ясного неба

Предположение, что разница ослабления между компонентами  $H$  и  $V$  незначительна, тогда  $(l_H / l_V) \exp[-j(\varphi_H - \varphi_V)]$  приблизительно равно единице и уравнение (84) становится:

$$XPI = -20 \log \left[ \frac{x_R}{g_R} + \frac{x_T}{g_T} + \frac{d_H}{l_V} \exp[-j(\gamma_H - \varphi_V)] \right]. \quad (85)$$

Вследствие изменений индекса атмосферной рефракции электромагнитное излучение в основном принимается с углом  $\delta$ , отличным от номинального. В результате получаем:

$$-20 \log \left[ \frac{x_R(\delta)}{g_R(\delta)} \right] = X_R(\delta) - G_R(\delta). \quad (86)$$

Диаграмму направленности в кроссполяризационной плоскости можно аппроксимировать с помощью следующего уравнения:

$$X_R(\delta) = X_{RN} - Q(\delta), \quad (87)$$

где  $Q(\delta)$  – ухудшение кроссполяризационной избирательности из-за отклонения распространения.

Вклад кроссполяризации вследствие распространения составит:

$$XPI_P = -20 \log \left[ \frac{d_H}{l_V} \exp[-j(\gamma_H - \varphi_V)] \right]. \quad (88)$$

Сделав соответствующие замены и используя фактические данные, представленные в литературе [Olsen, 1981 г.] вклад кроссполяризации вследствие распространения составит около 200 дБ ниже номинального уровня основной поляризации, развязка в уравнении (84) может быть записана следующим образом:

$$XPI = -20 \log \left[ 10^{-\frac{x_{RN} - Q(\delta) - G(\delta)}{20}} + 10^{-\frac{x_{TN}}{20}} \right]. \quad (89)$$

### 7.1.2.2 Условия дождя

В этом случае уравнение (84) не может упрощаться обычным способом, если для частот ниже 15 ГГц, аппроксимация  $(l_H / l_V) \exp[-j(\varphi_H - \varphi_V)] \cong 1$  все еще сохраняется.

Тогда развязка определяется:

$$XPI = -20 \log \left[ 10^{-\frac{x_{RN}}{20}} + 10^{-\frac{x_{TN}}{20}} + 10^{-\frac{XPD_p}{20}} \right]. \quad (90)$$

Медианное значение распространения вклада  $XPD_p$  определяется следующим равновероятным уравнением:

$$XPD_p = U - V \log(CPA), \quad (91)$$

где:

$$CPA = -20 \log |l_V \exp(-j\varphi_V)|. \quad (92)$$

это основное ослабление ( $g_T = g_R = 1$ ) и параметры  $U$  и  $V$  можно оценить, используя результаты в [Olsen, 1981 г.].

### 7.1.3 XPI вследствие многолучевого распространения (2 луча)

В случае помехи в двух или более компонентах луча, становится важным частотно-избирательное влияние. Рассматривая двухлучевую модель (луч 1 и луч 2), результирующее принимаемое поле в целом получается из уравнения (1) и может быть выражено:

$$\bar{E}_0 = \bar{E}_{01} + \bar{E}_{02} = (\bar{M}_1 + \bar{M}_2) \cdot \bar{E}_i = \bar{M} \cdot \bar{E}_i. \quad (93)$$

Используя уравнение (93) и определение (75) развязка получится:

$$XPI = -20 \log \left[ \frac{\frac{x_{T1}}{g_{T1}} + \frac{x_{R1}}{g_{R1}} + b \left( \frac{x_{T2}}{g_{T2}} + \frac{x_{R2}}{g_{R2}} \right) \exp(-j\varphi) + \frac{d_{H1}}{l_{V1}} \exp(-j\varphi_1) + \frac{d_{H2}}{l_{V2}} b \exp(-j\varphi_2)}{1 + b \exp(-j\varphi)} \right], \quad (94)$$

где:

$$b = \frac{g_{T2} l_{V2} g_{R2}}{g_{T1} l_{V1} g_{R1}} \quad (95)$$

относительная амплитуда, и:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_{V2} - \varphi_{V1}, \\ \varphi_1 &= \gamma_{H1} - \varphi_{V1}, \\ \varphi_2 &= \gamma_{H2} - \varphi_{V1}, \end{aligned} \quad (96)$$

где аппроксимация  $(l_H/l_V) \exp[-j(\varphi_H - \varphi_V)] \cong 1$ ,  $(l_H/l_V) \exp[-j(\varphi_H - \varphi_V)] \cong 1$  использовалась для обоих лучей. Следует отметить, что числитель и знаменатель в уравнении (94) представляют собой элементы матрицы передачи  $M$  без постоянной величины:

$$a_1 = g_{T1} l_{V1} g_{R1} \exp(-j\varphi_{V1}). \quad (97)$$

равно не селективному ослаблению канала с основной поляризацией.

Принимая для условного луча (луч 1) те же гипотезы и отношения, полученные в предыдущем разделе для одиночного луча и принимая обе антенны ( $T_x$  и  $R_x$ ) одинаковыми, уравнение (94) становится:

$$XPI = -20 \log \left[ \frac{10^{-\frac{XPI_1}{20}} + b \left( 2 \times 10^{-\frac{X_{RN} - Q(\delta_2) - G(\delta_2)}{20}} + d_{H2} \right) \exp(-j\varphi)}{1 + b \exp(-j\varphi)} \right], \quad (98)$$

где  $XPI_1$  определяется уравнением (84),  $\delta_1$  и  $\delta_2$  – углы прихода основного луча и второго луча по отношению к номинально указанному направлению.

### 7.1.4 Зависимость от ослабления по основной поляризации

Зависимость XPI от ослабления сигнала по основной поляризации может выражаться в среднем в отношении, похожем на то, какое было описано в Рекомендации МСЭ-R P.530:

$$XPI = C - CPA, \quad (99)$$

где:

$$CPA = -20 \log [a_1(1 + b \exp(-j\varphi))]. \quad (100)$$



Постоянный параметр  $C$  может быть получен из уравнения (98):

$$C = A_i - 20 \log \left[ 10^{-\frac{XPI_1}{20}} + b \left( 2 \times 10^{-\frac{X_{RN} - Q(\delta_2) - G(\delta_2)}{20}} + d_{H2} \right) \exp(-j\phi) \right]. \quad (101)$$

Глубокие замирания обычно подавляются избирательностью, и в уравнении (100) можно пренебречь вкладом  $a_i$  неглубоких замираний. Кроме того, установление следующих ограничений,  $b \rightarrow 1$  и  $\exp(-j\phi) \rightarrow 1$ ,  $C$  можно вычислить при помощи следующего уравнения:

$$C = -20 \log \left[ 10^{-\frac{X_{TN}}{20}} + 10^{-\frac{X_{RN} - Q(\delta_1) - G(\delta_1)}{20}} - 2 \times 10^{-\frac{X_{RN} - Q(\delta_2) - G(\delta_2)}{20}} - d_{H2} \right]. \quad (102)$$

Нелишне отметить, что  $C$  почти не зависит от замирания в канале основной поляризации (параметры  $a_i$  и  $b$ ), и уравнение (101) становится действительно совместимым с разделением переменных. В уравнении (102) выражается дальнейшая зависимость от случайных переменных, например углы прихода входящих лучей и деполяризации земли (если применимо).

В уравнении (99) также можно заметить, что особенно с равно передающими и принимающими антеннами, параметр  $C$  практически равен значению  $d_{H2}$  (дБ). Другими словами режим работы канала с двойной поляризацией в условиях распространения с глубоким замиранием подавляют свойства избирательности среды распространения, а не антенны.

Значение  $C$  можно получить или моделируя случайные процессы, включенные в уравнение (102), или из результатов эксперимента.

## 7.2 Статистические данные для прогнозирования XPD в условиях ясного неба

Опять же в соответствии с результатами Окончательного отчета COST 235, чтобы оценить возможность получения приемлемого качества при двойной поляризации, должны быть выполнены две основные задачи. Первая задача заключается в том, чтобы иметь адекватный метод прогнозирования для уменьшения XPI (или XPD), которая может применяться к любой радиолинии. Вторая задача состоит в том, чтобы получить метод прогнозирования работы, позволяющей получить качественную передачу с подавителем помех, вызванных кроссполяризацией (XPIC) или без него.

Относительно предыдущей задачи, экспериментальные результаты показали, что уменьшение XPI и XPD статистически эквивалентно. Это означает, что измеренное уменьшение XPD, как правило полученное от принимаемых уровней основных и кроссполяризационных сигналов во время передачи одной единственной поляризации (определенной как уравнение (72)), может использоваться для того, чтобы оценить распространение XPI. Основной отправной точкой является уравнение (95), где требуется оценка параметра  $C$ . Если принимается, что функция распределения сигнала с основной поляризацией имеет отклонение от оси 10 дБ/декаду (рэлеевское распределение для глубоких замираний), функция распределения XPD следующая:

$$P_r(XPD < x) = P_0 \times 10^{-\frac{C-x}{10}} \quad \text{для } x < C - 15 \text{ дБ}, \quad (103)$$

где  $P_0$  показатель частоты возникновения многолучевости. Простейший подход должен считать параметр  $C$  константой, полученной из экспериментальных данных, Рекомендация МСЭ-R P.530 предлагается следующее уравнение:

$$C = XPD_0 + Q, \quad (104)$$

где  $XPD_0$  стационарная XPD в условиях отсутствия замираний и  $Q$  это коэффициент улучшения, который показывает значительную зависимость диаграммы направленности антенны по кроссполяризации от отклонения от оси ( $x_T$  и  $x_R$ ).

В Окончательном отчете COST 235 были рассмотрены два отдельных метода прогнозирования, отмеченные как методы  $P$  и  $Q$ . Метод  $Q$  был выбран как основа для процедуры прогнозирования, используемой в Рекомендации МСЭ-R P.530, он будет обсуждаться несколько детальнее в этом разделе позже. Больше информации о методе  $P$  можно найти в Окончательном отчете COST 235 [COST, 1996 г.]. В методе  $Q$  можно получить параметр  $C$  из основной формулировки, предложенной в уравнении (101), выполняющем моделирование случайных процессов методом Монте-Карло. Что касается второй задачи, оба метода рассматривают кроссполяризованный мешающий сигнал как источник шума, который будет складываться с тепловым шумом. Метод  $Q$ , основанный на предположении (основанный на экспериментальных данных), что там существует высокая степень декорелляции между сигналом с основной поляризацией и мешающим кроссполяризованным сигналом, а именно произойдет уменьшение XPI, когда сигнал с основной поляризацией, находящийся под воздействием сильных селективных замираний, в основном, не будет кроссполяризованным. В этом случае распределение XPI может использоваться для оценки перерывов в работе из-за распределения XPI и эта величина вместе с небольшим перерывом в работе определяет общее время неселективного перерыва в работе. При использовании подходящего аппаратного средства, зависящего от коэффициента улучшения за счет кроссполяризации (XPIF), можно оценить вклад перерыва в работе из-за уменьшения XPI при наличии устройства XPIС.

### 7.2.1 Описание Метода $Q$

Метод  $Q$  был разработан в рамках проекта COST 235.

Модель представлена в этом разделе пошаговой процедурой.

Первая часть этой процедуры вычисляет параметры  $XPD_0$  и  $Q$  уравнения (104).

$XPD_0$  вычисляется из:

$$XPD_0 = XPD_g + 5 \quad XPD_g < 35, \quad (105)$$

$$XPD_0 = 40 \quad XPD_g > 35. \quad (106)$$

Далее, вычисляется показатель частоты возникновения многолучевости  $p_0$ , соответствующий проценту времени среднего наихудшего месяца, в течение которого превышает уровень  $A = 0$  дБ. Из этой суммы, доля замираний соответствующих многолучевости различна при использовании параметра, отражающего степень активности многолучевости  $\eta$ , и определяется как вероятность достаточно глубоких замираний на данной частоте.

Рекомендация МСЭ-R P.530, использующая следующий параметр, отражающий степень активности многолучевости:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}}. \quad (107)$$

В Методе  $Q$  затем вычисляется коэффициент  $Q$ , использующий следующий параметрический подход:

$$Q = -10 \log \left( \frac{K \cdot \eta}{P_0} \right). \quad (108)$$

Рекомендация МСЭ-R P.530 определяет коэффициент  $K$  в уравнении (108)  $K_{XP}$ , и использует следующее уравнение для его определения для 1 или 2 передающих антенн:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{одна передающая антенна} \\ 1 - 0,3 \exp \left[ -4 \times 10^{-6} \left( \frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{две передающие антенны} \end{cases}, \quad (109)$$

где в блоке данных  $s_t$  – разнесение антенн и  $\lambda$  – длина волны несущей.

Наконец, параметр  $C$  находится из уравнения (101).

Вероятность сбоя  $P_{XP}$  за счет кроссполяризации в условиях ясного неба рассчитывается как:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}}, \quad (110)$$

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

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{без XPIС} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{с XPIС.} \end{cases} \quad (111)$$

Здесь  $C_0/I$  – отношение несущей к помехе для эталонного КОБ, 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 КОБ системы в присутствии XPIС и без него. Обычно XPIF имеет величину порядка 20 дБ.

Сигнал с основной поляризацией принимает рэлеевское распределение для глубоких замираний, для того чтобы вклад в уменьшение XPD для перерыва в работе системы находился как:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}}. \quad (112)$$

### 7.2.2 Примеры применений

Местоположение: Хьюстон, Техас, США

Широта: 29° 46' с. ш.

Долгота: 264° 78' в. д.

Частота:  $f = 8$  ГГц

Длина трассы:  $d = 45$  км

Высота передающей антенны:  $h_t = 500$  м

Высота приемной антенны:  $h_r = 610$  м.

*Шаг 1:* Для  $XPD_g = 42$  дБ, т. е. минимального гарантированного производителем XPD для передающей/приемной антенн,  $XPD_0 = 40$  дБ.

*Шаг 2:* Тогда параметр, отражающий степень активности многолучевости рассчитывается как:

$$\eta = 1 - e^{-0,2P_0^{0,75}} = 0,026, \quad (113)$$

где  $P_0 = p_w/100 = 0,0659$  – показатель частоты многолучевости, в течение которого превышает уровень  $A = 0$  дБ.

*Шаг 3:* Определяется  $Q = -10 \log \left( \frac{k_{XP} \eta}{P_0} \right) = 5,622$ ,

где:

$$k_{XP} = 1 - 0,3 \exp \left[ -4 \times 10^{-6} \left( \frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] = 0,7033 \quad (114)$$

предполагается, что различные антенны передают два ортогонально поляризованных сигнала, их вертикальное разнесение будет  $s_t = 2$  м.

Шаг 4: Запас на эквивалентный XPD для эталонного КОБ составит (при условии, что использовался подавитель кроссполяризационных помех с  $XPIF = 20$  дБ):

$$M_{XPD} = C - C_0/I + XPIF = 33,62 \quad \text{дБ}, \quad (115)$$

где  $C = XPD_0 + Q = 45,622$  дБ и  $C_0/I = 32$  дБ отношение несущей к помехе для эталонного КОБ.

Шаг 5: Наконец, вероятность сбоя в условиях ясного неба для кроссполяризации имеет вид:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} = 2,8 \times 10^{-5}. \quad (116)$$

### 7.3 Статистические данные для прогнозирования XPD в условиях атмосферных осадков

Экспериментальные данные показывают что, так как размеры капель увеличиваются, их форма становится не сферической и похожа сжатый сфероид с ярко выраженном увеличивающимся плоским основанием, в котором развивается уменьшение вогнутости для капель очень больших размеров [Pruppacher и Beard, 1970 г. и Pruppacher и Pitter, 1971 г.]. К тому же дождевые капли также могут быть горизонтально наклонены [Saunders, 1971 г.]. Эти два эффекта, которые являются причиной кроссполяризации в условиях дождя, более подробно рассмотрены в Справочнике по радиометеорологии. Большинство статистических данных для прогнозирования XPD в условиях атмосферных осадков теперь используются в полуэмпирическом виде [Olsen, 1981 г.]. Они смоделированы общей теорией для дождя с произвольно наклоненными каплями [Olsen, 1981 г.] и с выбранными параметрами, для того чтобы создать приблизительное сходство с экспериментальными данными. Обычно принимается модель с двумя параметрами, основанная на гауссовском распределении угла наклона капель [Kobayashi, 1977 г. и Nowland и др., 1977 г.].

#### 7.3.1 Основа методов прогнозирования XPD в условиях атмосферных осадков

Для большинства практических применений, соотношение между кроссполяризационной избирательностью (XPD) и ослаблением в дожде для сигналов с основной поляризацией (CPA) является самым важным для прогнозирований, основанных на статистике ослаблений.

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 ослабления в дожде для сигналов с основной поляризацией (CPA) пользуясь соотношением равной вероятности.

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad \text{дБ}. \quad (117)$$

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:

$$U = U_0 + 30 \log f, \quad (118)$$

$$\begin{aligned} V(f) &= 12,8 f^{0,19} && \text{для } 8 \leq f \leq 20 \text{ ГГц} \\ V(f) &= 22,6 && \text{для } 20 < f \leq 35 \text{ ГГц} \end{aligned} \quad (119)$$

Среднее значение  $U_0$ , равное приблизительно 15 дБ, было получено для ослаблений 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 (117) использовать значение CPA для круговой поляризации.

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

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log(f_2 / f_1) \quad \text{для} \quad 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ ГГц}, \quad (120)$$

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 вышеприведенного уравнения минимальна при больших различиях соответствующих частот. Однако оно наиболее точно, если  $XPD_1$  и  $XPD_2$  соответствуют одному типу поляризации (горизонтальной или вертикальной).

### 7.3.2 Примеры применений

Местоположение: Париж, Франция

Широта:  $48^\circ 52'$  с. ш.

Долгота:  $02^\circ 20'$  в. д.

Частота:  $f = 30$  ГГц

Длина трассы:  $d = 8$  км

Линейная поляризация:  $\tau = 90^\circ$ .

*Шаг 1:* Для указанных параметров эквивалентное ослабление на трассе находится из:

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF)/V)} = 33 \text{ дБ}, \quad (121)$$

где  $U = U_0 + 30 \log f = 15 + 30 \log 30 = 59,31$ , отношение несущей к помехе  $C_0/I = 25$  дБ и  $V = 22,6$  для данного диапазона частот. Устройство XPIС не использовалось.

*Шаг 2:* Затем определяются следующие параметры:

$$m = 23,26 \log [A_p / 0,12 \quad A_{0,01} = 23,75], \quad (122)$$

$$n = (-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m}) / 2 = -2,28. \quad (123)$$

*Шаг 3:* Вероятность сбоя XPD при атмосферных осадках вычисляется как:

$$P_{XPR} = 10^{n-2} = 5,25 \times 10^{-5}. \quad (124)$$

### 7.4 Относительное воздействие ухудшения XPD в условиях ясного неба и дождя

Ни одно правило не может определить, какое из двух воздействий (дождь или многолучевость) является доминирующим при рассмотрении характеристик трассы. Тогда пользователю предлагается оценить оба ухудшения, и в условиях дождя и при многолучевости, применяя вышеизложенные методы при проектировании систем. Однако обычно замечается, что для двойных, горизонтально и вертикально поляризованных систем с разнесением или без него, доминирующей причиной ухудшения на коротких трассах является дождь и многолучевость на длинных трассах. Наименьшая длина трассы, для которой доминирует влияние многолучевости, зависит от частоты, климата, просвета трассы, прохождения линии над земной или водной поверхностью и применения разноса. В случае не разнесенного приема, измерения в диапазоне от 10 до 12 ГГц в Европе для трасс короче 20 км [Watson, 1976 г.] показывают, что дождь оказывает больше влияния. Измерения в диапазоне от 6 до 13 ГГц для трасс, длиннее чем 50 км [Rooryck и Battesti, 1976 г.] показывают, что более важным является влияние многолучевости. Они также показывают, что ухудшение XPD из-за дождя не значительно увеличивают время отключения, потому что уменьшение XPD имеет тенденцию происходить в то же самое время, когда происходит сильное ослабление.

### 7.5 Явление кроссполяризации, обусловленное песчаными и пылевыми бурями

До настоящего времени никакие количественные наблюдения за кроссполяризацией во время песчаных и пылевых бурь не были изданы в открытой литературе. Поэтому все оценки воздействия кроссполяризации на микроволновых линиях в условиях песчаных и пылевых бурь основаны на теоретических соображениях относительно размера частиц, формы, численной плотности и диэлектрических свойствах. Микроскопические исследования [McEwan и др., 1985 г. и Ghobrial и Sharief, 1987 г.] ясно показали, что частицы песка и пыли, которые несут экваториальные бури, имеют несферическую форму. Далее расчеты позволяют предположить, что при отсутствии турбулентности или сдвига ветра, гидродинамические силы будут иметь тенденцию ориентировать взвешенные частицы от их основной оси в вертикальную плоскость [McEwan и др., 1985 г.]. В результате этой неизотропности они может произойти ухудшение XPD вследствие дифференциального сдвига фаз, при этом ослабление может быть незначительным. Аналогичные условия могут применяться к непрямой линейной поляризации [Bashir и McEwan, 1986 г.]. Теоретические исследования [Ghobrial и Sharief, 1987 г.] предполагают, что в сухих пылевых бурях XPD для круговой поляризации может быть связано с видимостью уравнением:

$$XPD = 91,6 - 20 \log (fd) + 21,4 \log V, \quad (125)$$

где:

- $f$ : частота (ГГц),
- $d$ : длина трассы (км),
- $V$ : видимость (км).

XPD дополнительно сокращается примерно на 1,7 дБ для пыли, содержащей 4% поверхностную влажность.

## 8 Способы уменьшения влияния многолучевого распространения

При проектировании линии наземных линий связи прямой видимости должно учитываться влияние относительно медленного не избирательного по частоте замирания, т. е. "амплитудного замирания", и частотно-избирательного замирания. 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 кроссполяризации. Их можно разделить на методы, не требующие применения определенного вида разнесенного приема или передачи, и методы, требующие разнесения (полностью системные методы, такие как адаптивная коррекция, обсуждаются в соответствующем Справочнике по цифровым радиорелейным системам МСЭ-R).

Поскольку по экономическим причинам желательно, по возможности, избегать применения разнесения, в п. 8.1 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. 8.2, включая пространственное разнесение в п. 8.2.1, методы углового разнесения в п. 8.2.2, методы частотного разнесения в п. 8.2.3 и поляризационное разнесение в п. 8.2.4. Методы разнесения для уменьшения избирательности по кроссполяризации в системах, использующих двойную поляризацию и повторное использование частот, обсуждаются отдельно в п. 8.3.

### 8.1 Стратегии и методы без разнесения

Методы без разнесения для уменьшения самых серьезных влияний, связанных с многолучевыми замираниями, могут классифицироваться в одну или более из трех основных стратегий [Olsen, 1989 г.]:

*Стратегия А:* уменьшение появления случаев "амплитудных замираний" из-за механизмов, происходящих в атмосфере: такие механизмы включают расширение луча (в англоязычной технической литературе обычно называемого дефокусировкой) и антенную развязку, которые обычно происходят вместе и многолучевость при распространении в атмосфере. Цель сокращения возникновения этих механизмов состоит в том, чтобы уменьшить вероятность того, что амплитуда атмосферной волны (прямой волны, если при распространении в атмосфере нет многолучевости) снизится до уровня, при котором мешающий сигнал вычитается из сигнала, отраженного от земной поверхности, что в результате приведет к серьезным многолучевым замираниям и искажениям. Хотя атмосферная многолучевость сама по себе может быть немного частотно-избирательной в диапазоне,

обычно понятие "плоский" ее характеристик амплитуды и задержки сравнивается с поверхностным многолучевым распространением, которое происходит, когда мешающая атмосферная волна вычитается от одной или нескольких волн, отраженных от земной поверхности.

*Стратегия В:* уменьшение появления случаев значительных отражений от поверхности: подобно первой стратегии, цель этой стратегии также состоит в том, чтобы уменьшить вероятность полной интерференции, которая вызывает серьезные многолучевые замирания и искажения, между атмосферной волной и волнами, отраженными от поверхности.

*Стратегия С:* уменьшение значительной задержки отражений от поверхности по отношению к атмосферной волне: цель данной стратегии состоит в уменьшении крутизны амплитуды и искажений, что происходит, когда существует полная интерференция, которую, как правило, не избежать, между атмосферной волной и волнами, отраженными от поверхности.

Различные методы, представленные в Рекомендации МСЭ-R P.530, разработаны ниже и демонстрируют выполнение одной или более этих стратегий.

### 8.1.1 Увеличение наклона трассы

Этот метод, иногда называемый методом "высокий-низкий" [Vigants, 1975 г. и Fehlhaber, 1976 г.], должен использоваться каждый раз, когда позволяет рельеф. Здесь могут быть реализованы и Стратегия А и Стратегия В. Во-первых, сфера действия потерь при расширении луча и присоединенная антенная развязка имеют тенденцию снижаться, когда угол прямой волны возрастает относительно структур с сильной дифракцией, таких как каналы, вызывающие эти эффекты. Во-вторых, уровень зеркально и диффузно отраженной волны или волн имеет тенденцию снижаться, поскольку:

- меньшая энергия распространяется от прямой волны в направлении поверхности,
- меньше общий коэффициент направленного действия двух антенн в направлении отражения,
- углы скольжения отраженных волн обычно увеличиваются.

В случаях, когда замирание атмосферной волны вызвано многолучевостью при распространении в атмосфере, это также дает основания для анализа траектории луча [Webster, 1983 г.], т. е. увеличение наклона трассы уменьшает ее падение.

Улучшение последствий многолучевых замираний при увеличении наклона трассы можно увидеть в количественном виде в некоторых уравнениях прогноза в Рекомендации МСЭ-R P.530. В частности, уравнения (7) и (8) в этой Рекомендации в явном виде показывают, что процент времени, в течение которого превышение глубины замирания уменьшается. Это отношение дает фактически основу для вычисления коэффициента появления многолучевости, который определяет величину амплитудных замираний (см. уравнение (24)), величину селективных замираний и уменьшение *XPD* в системах с повторным использованием частот и двойной поляризацией (см. уравнение (49)).

Очевидно, что при использовании этого метода предпочтителен холмистый и горный рельеф. Такой тип рельефа также имеет дополнительное преимущество, что используемые неровности и углы возвышения связаны с уменьшенным наклоном крайних слоев рефракции, таких как каналы. Так как очевидное неудобство метода состоит в том, что длины трасс обычно короткие, решение нужно искать между очевидным экономическим преимуществом большой длины трассы и техническим (и потенциально экономическим) преимуществом в борьбе с наиболее серьезным влиянием многолучевого распространения. К сожалению, в настоящее время нет четких правил нахождения такого компромисса.

Хотя данный метод в целом ведет к уменьшению интенсивности отражений от поверхности, могут возникать случаи, когда будет происходить противоположное. Наиболее очевидная ситуация, чтобы этого избежать одна, там, где основное отражение происходит от поверхности воды или плоской земли. С некоторой осторожностью можно выбрать геометрические пути, по которым трасса пролегает и по относительно наклоненной местности и имеет блокировку относительно отражений от поверхности на промежуточной территории.

### 8.1.2 Уменьшение влияния отражений от поверхности

Несколько методов приведены в Рекомендации МСЭ-R P.530 для уменьшения влияния отражения от поверхности (Стратегия В), для того чтобы уменьшить появление замираний из-за поверхностной многолучевости. Основа этих методов и дополнительные существенные моменты обсуждаются ниже.

### 8.1.2.1 Экранирование точки отражения

Один из методов заключается в том, чтобы воспользоваться холмами, горами или зданиями вдоль трассы для экранирования антенн от более зеркально-отражающих поверхностей, например, водные поверхности, равнины, гладкие вершины холмов, не покрытые деревьями, верхние части зданий, и использовался он с первых дней проектирования радиорелейных линий связи. Наличие компьютерной основы для отслеживания луча позволяет эффективно ее применять и принимать во внимание широкий диапазон эффективных значений коэффициента  $k$ . Пример недостатка этого метода, это суперрефракция волны, отраженной от поверхности над горным хребтом, которая предполагала заблокировать отражение [Lam и Webster, 1985 г.], что показывает важность такого анализа отслеживания луча.

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

Этот метод заключается в регулировании 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. Особенно важно избежать отражений от водных поверхностей, если это возможно.

### 8.1.2.3 Оптимальный выбор высоты антенн

Этот метод, представленный пошаговой процедурой в Рекомендации МСЭ-R P.530, не обязательно уменьшает уровень отражений от поверхности. Вместо этого он разработан для упорядочивания усиливающейся интерференции между прямой волной и основными волнами, отраженными от поверхности (обычно одна единственная волна), для того чтобы избежать вредного воздействия многолучевых замираний. Для диапазона эффективных значений  $k$  это возможно только на коротких трассах или немного протяженных трассах на нижних частотах. Пошаговая процедура в Рекомендации МСЭ-R P.530 представлена таким образом, чтобы позволить пользователю определить в какой точке необходимо разнесение.

Основа метода представлена в двух публикациях [Boithias, 1983 г. и Karl и Persson, 1998 г.]. Единственное различие состоит в том, что в более ранней публикации решение представлено в аналитическом виде, тогда как в поздней – в виде усеченного ряда.

### 8.1.2.4 Выбор вертикальной поляризации

На надводных трассах на частотах выше примерно 2 ГГц целесообразно выбирать вертикальную поляризацию вместо горизонтальной. Пошаговые процедуры, представленные в Рекомендации МСЭ-R P.530, предназначены для того чтобы вычислить эффективный коэффициент отражения площади поверхности и для его измерения.

Главная математическая основа методов в Рекомендации МСЭ-R P.530 была описана [Boithias, 1983 г.]. Дополнительным элементом является введение коэффициента шероховатости поверхности. Типичная гауссовская аппроксимация для этого коэффициента [Beckmann и Spizzichino, 1963 г.] была заменена на модифицированную гауссовскую аппроксимацию, основанную на экспериментальных данных для морских поверхностей [Miller *и др.*, 1984 г.]. Сделано предположение, что такая модифицированная форма также является более точной для земли [Olsen *и др.*, 1987 г.].

### 8.1.2.5 Использование избирательности антенны

На трассах с достаточно большим наклоном или трассах с естественным значительным просветом углы между прямой волной и отраженной от поверхности волной (волнами) становятся достаточно большими, чтобы можно было использовать диаграмму излучения одной или обеих антенн для обеспечения избирательности в отношении отраженной волны (волн). Даже без этого естественного преимущества может оказаться полезным немного наклонить вверх одну или обе антенны для увеличения доступной степени избирательности. Для этого в Рекомендации МСЭ-R P.530 представлена пошаговая процедура. Здесь могут быть реализованы одновременно и Стратегия А, в меньшей степени, и в большей степени Стратегия В. Очевидно, что сильные отражения от поверхности уменьшаются в результате уменьшения избирательности антенны в направлениях этих отражений.

Величина наклона вверх антенны для уменьшения влияния поверхностной многолучевости была показана из измерений в некоторых публикациях [Hartman и Smith, 1977 г.; Sasaki *и др.*, 1987 г.; Satoh *и др.*, 1989 г. и Prasad *и др.*, 1991 г.] среди других. Измерения трех сильных лучей на трассах длиной 31, 41 и 51 км в центрально-восточной части Северной Америки [Webster, 1991 г.] подтверждают, что наклон вверх будет ставить в худшие условия лучи, приходящие прямо от поверхности, и показывают, что в условиях многолучевости сильный луч (обычно прямой луч) обычно принимается с правильным углом прихода. Оценка угла прихода луча в Рекомендации МСЭ-R P.530 [Karl и Persson, 1998 г.] для  $k = \infty$  соответствует наиболее вероятным значениям, т. е. режимам из этих измерений.



Для определения оптимальных углов наклона в Рекомендации МСЭ-R P.530 приведены два дополнительных метода, в одном из которых минимизируется максимальная глубина замираний от поверхностной многолучевости, а в другом минимизируются амплитудные искажения. Первый метод основан на хорошо известных уравнениях для отражения от поверхности [Boithias, 1983 г.; Karl и Persson, 1998 г.] аппроксимации диаграммы направленности главного лепестка антенны через гауссовское распределение [Olsen *и др.*, 1987 г.] и текущего понимания физики многолучевого распространения [Olsen *и др.*, 1987 г.; Olsen, 1989 г. и Segal, 1999 г.]. Однако необходимо отметить, что метод не чувствителен к особенностям реальных положений, которые моделируются. Второй подход основан на другом методе, [Tanem, 1988 г.] который применяет полные требования к тому, что диаграмма направленности антенны известна. Как уже отмечалось, если потери в плоскости запасов на замирания, полученные вследствие угла наклона и передающей и приемной антенн, ограничены примерно 6 дБ, то нет необходимости применять диаграмму направленности антенны. Также отмечалось, какой из методов или компромисс, будет зависеть от характеристик систем. Оба метода сходны с рассматриваемыми наблюдениями угла разнесения, полученными из нескольких стран, применяющих наклон только антенны приемника [Satoh *и др.*, 1989 г. и Sasaki *и др.*, 1991 г.].

Нужно отметить, что наклон вверх антенн улучшит влияние поверхностной многолучевости, и во многих случаях также будет иметь тенденцию к улучшению влияния атмосферной многолучевости. Такой вывод можно сделать из анализа обеих траекторий луча [Webster, 1983 г.] и широких анализов измерений амплитуд и углов прихода по трех сильным путям на трассе длиной 51 км в центрально-восточной части Северной Америки [Webster *и др.*, 1994 г.]. Причина состоит в том, что более сильный из двух сильных лучей атмосферной многолучевости имеет тенденцию иметь также и больший угол прихода. Таким образом, если антенна приподнята на большой угол, что означает больший угол прихода, разница в уровне между двумя сильными лучами атмосферной многолучевости, скорее всего, возрастет. Измерения на трассах длиной 31, 41 и 51 км [Webster, 1991 г.] показали, что самый сильный луч обычно имеет потери угла прихода примерно 0,3°. Это является основанием для заявления в Рекомендации МСЭ-R P.530, что наклон вверх должен быть нормально оптимизирован для уменьшения влияния поверхностной многолучевости.

### 8.1.3 Уменьшение просвета трассы

Метод минимизации просвета трассы, для того чтобы ослабить влияние многолучевых замираний может быть один из лучших из имеющихся, но опубликованные факты пока еще, к сожалению, бедны [Olsen и Segal, 1992 г.]. Большинство отчетов смешны в части проектирования линий связи. Так как уменьшение просвета трассы в результате может дать увеличивающееся падение дифракционных потерь в условиях субрефракции (см. п. 3.3), метод несколько опасен на трассах без пространственного разнесения, если сумма дифракционных потерь может правильно оцениваться.

Для нескольких регионов мира предложены методы оценки дифракционных потерь и их применение позволит допустить некоторые дифракционные потери [Giloï, 1979 г.; Kalinin, 1979 г.; Nadenenko, 1981 г.; Vigants, 1981 г. и Olsen и Segal, 1992 г.]. Правило просвета трассы, изложенное в п. 2.2.2.1 Рекомендации МСЭ-R P.530 [Olsen и Segal, 1992 г.] разработано для того, чтобы избежать дифракционных потерь в нормальных условиях рефракции, т. е. эффективного медианного значения  $k$ , но чтобы позволить дифракционным потерям иметь значение около 6 дБ в условиях, соответствующих  $k_e$  (99,9%). В принципе, для систем с достаточно большими плоскими границами замирания, может допускать большое количество дифракционных потерь и условия субрефракции.

Считается, что результаты метода эффективны, потому что трассы с меньшим просветом имеют меньше сильных слоев рефракции, таких как канал, который может быть ниже трассы, таким образом, уменьшается явление серьезных потерь при расширении луча прямой волны и, следовательно, вероятность серьезных помех с сигналами, отраженными от поверхности [Olsen, 1989 г. и Olsen и Segal, 1992 г.]. Если бы это было так, тогда метод приближался бы и к Стратегии А и к Стратегии С, выше. Уменьшение значительной задержки отражений от поверхности произошло бы главным образом вследствие уменьшения в большом компоненте задержки из-за двусторонней передачи через слой, находящийся под трассой, а также из-за уменьшения геометрической компоненты задержки [Olsen *и др.*, 1987 г. и Olsen, 1989 г.].

## 8.2 Методы разнесения

Каждый раз, когда методы, приведенные в предыдущем, разделе не ослабляют влияния многолучевых замираний и искажения уменьшают допустимые уровни перерывов в работе оцениваемой системы, должны использоваться дополнительные методы разнесения. Методы разнесения включают пространственное, угловое, частотное и поляризационное разнесение. Как отмечено в Рекомендации МСЭ-R P.530, частотное разнесение по возможности следует избегать, для того 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.

### 8.2.1 Пространственное разнесение

Системы с пространственным разнесением обычно используют две вертикально разнесенные антенны на одном конце линии. Такая конфигурация со стандартным разнесением обычно является относительно эффективной для борьбы против влияния многолучевых замираний и искажений, но для других проблем на линии применяются другие конфигурации. Увеличение интервала между антеннами было предложено в качестве способа для более эффективной борьбы с влиянием расширения луча и связанных с ним замираний, вызванных поверхностной многолучевостью [Olsen, 1989 г.]. Использование нижних просветов трассы в диапазоне рекомендуется для разнесения антенн в Рекомендации МСЭ-R P.530, что должно привести к желательному результату. Для линий, в которых потери при расширении луча еще более сильные, оказалось эффективным использование пространственного разнесения антенн на обоих концах линии [Boithias, 1979 г. и Hautefeuille *и др.*, 1980 г.].

### 8.2.2 Разнос антенн в системах пространственного разнесения

Рекомендация МСЭ-R P.530 приводит пошаговую процедуру для определения разноса антенн в системах пространственного разнесения с двумя и тремя антеннами. Процедура включает соотношение между:

- a) необходимостью поддержания минимального по возможности просвета для нижней антенны (в рамках руководящих указаний, приведенных в п. 2.2.2 Рекомендации МСЭ-R P.530), для того чтобы свести к минимуму число случаев появления замираний из-за поверхностной многолучевости (см. п. 8.1.3),
- b) необходимостью получения заданного коэффициента улучшения качества за счет пространственного разнесения для трасс, проходящих над сушей (см. п. 8.2.2), и
- c) 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.

Это частично основывается на процедуре, для того чтобы оптимизировать разнесение для борьбы с поверхностной многолучевостью [Karl и Persson, 1998 г.] и частично на понимании физики поверхностной многолучевости [Olsen *et al.*, 1987 г.; Olsen, 1989 г.; Webster, 1991 г.; Rana *и др.*, 1993 г., 1995 г. и Segal, 1999 г.]. Подход для случая использования пролета из двух ветвей с применением пассивного отражателя частично основан на измерениях, проводимых на частоте 6 ГГц с применением ветвей, равных 50,7 км и 15,3 км [Vigants, 1975 г.].

### 8.2.3 Угловое разнесение в системах с угловым разнесением и системах с комбинированным пространственно/угловым разнесением

Угловое разнесение может быть достигнуто при помощи:

- a) одной многофидерной антенны с двумя или более лучами, разнесенными на малые углы в вертикальной плоскости,
- b) использования двух антенн, разнесенных горизонтально и наклоненных под разными углами в вертикальной плоскости, или
- c) использования разнесения антенн с вертикальным пространственным разнесением, которые наклонены под разными углами в вертикальной плоскости.

Подход эффективен, потому что соответствующие лучи различны по отношению к многолучевым сигналам с разными углами прихода в вертикальной плоскости. Таким образом, два или более многолучевых сигнала, которые объединяются, с тем чтобы вызвать глубокое многолучевое частотно-избирательные замирания будут объединяться в разных соотношениях с другим лучом, вероятно избегая некоторых глубоких и селективных замираний. Подходы а) или б) применимы, когда система с разнесением должна устанавливаться на уже существующей антенной мачте или на не очень высокой антенной мачте, с тем чтобы обеспечить пространственным разнос. Если угловое разнесение реально осуществить, эти подходы могут также применяться на новых антенных мачтах, для того чтобы свести к минимуму высоту мачты. Помимо увеличенной стоимости такой антенны, еще одним небольшим недостатком метода с одной антенной является то, что луч разнесения "серийных" антенн может быть неоптимальным на конкретной трассе, где используется антенна.

Использование углового разнесения в сочетании с пространственным разнесением применяется всегда, когда последнее используется для обеспечения максимальной производительности. Это особенно важно на трассах, где имеются значительные зеркальные отражения от поверхности. Однако поскольку есть некоторые расходы, если используется соответствующий наклон антенн для

обеспечения углового разнесения, общепринято, что применимо может быть только пространственное разнесение на некоторых трассах, где расчеты будут достаточно очевидными. К сожалению, существует немного доступных измерений в случае сочетания пространственного разнесения с наклоном антенны [Satoh *и др.*, 1989 г.; Vergeres *и др.* г., 1990 и Sasaki *и др.*, 1991 г.].

Исторический обзор и результаты ранних измерений приведены в другом месте [Lin *и др.*, 1988 г.]. Другой обзор [Olsen, 1989 г.] обсуждает измерения и их значения с точки зрения физики многолучевого распространения. После этого времени имеются данные лишь о нескольких других измерениях при угловом разнесении, и эти исследования изложены в [Satoh *и др.*, 1989 г.; Vergeres *и др.*, 1990 г. и Sasaki *и др.*, 1991 г.; Tjelta *и др.*, 1991 г.; Alley *и др.*, 1992 г.; Di Zenobio *и др.*, 1992 г. и Danielsson Johansson, 1993 г.].

Рекомендация МСЭ-R P.530 приводит процедуру для установления углов наклона лучей антенны в приложениях b) и c). Процедура основана на совокупности имеющихся экспериментальных результатов, касающихся существующей теории [Boithias, 1983; Tanem, 1988 г. и Karl и Persson, 1998 г. и знаниях физики многолучевости [Olsen *и др.*, 1987 г.; Olsen, 1989 г. и Segal, 1999 г.]. Однако особое внимание было уделено детальным экспериментам углового и пространственного разнесения с использованием многостанционной антенны с углами наклона [Dombek, 1986 г. и Valentin *и др.*, 1987 г., 1989 г. и 1990 г.], больше, чем на одной трассе [Sasaki *и др.*, 1987 г.; Satoh *и др.*, 1989 г.; Valentin *и др.*, 1990 г. и Sasaki *и др.*, 1991 г.], и исследованиями, при наличии амплитудных замираний и селективных замираний [Valentin *и др.*, 1990 г.] или совместного моделирования [Satoh *и др.*, 1989 г. и Sasaki *и др.*, 1991 г.]. Также, особое внимание было уделено ряду долгосрочных экспериментов, включающих измерение отдельных углов прихода и уровней многолучевых сигналов на пяти различных трассах, проходящих над сушей и над водой [Lam и Webster, 1985 г.; Webster, 1991 г.; Rana *и др.*, 1992 г., 1993 г. и 1995 г. и Webster *и др.*, 1994 г.].

Основа данной процедуры для определения угла наклона вверх одного луча антенны описано в п. 8.1.2.5. Приводятся два метода, один из которых основывается на минимизации максимальной глубины замирания, а другой на минимизации амплитудных искажений. Как уже отмечалось, оба метода согласуются с обзором наблюдений при угловом разнесении, проводимых несколькими странами с применением наклонной антенны только на приемнике [Satoh *и др.* 1989 г. и Sasaki *и др.*, 1991 г.].

Наклон другого луча антенны вниз на трассах с достаточно существенными отражениями от поверхности дает дополнительное преимущество, для того чтобы обеспечить дополнительную защиту за счет разнесения в условиях серьезных амплитудных замираний, вызванных расширением луча прямой волны, рассмотренной в ходе экспериментов, в которых был извлечен элемент амплитудного замирания сигнала [Valentin *и др.* 1989 г. и 1990 г.]. Это также согласуется с исследованиями траектории луча [Olsen *и др.*, 1987 г. и Sasaki *и др.* 1987 г.] и наблюдениями, что поверхностная многолучевость обычно увеличивается, когда происходит амплитудное замирание из-за расширения луча прямой волны [Olsen *и др.*, 1987 г. и Rana *и др.*, 1992 г., 1993 г.]. Угол наклона проектируется в направлении большего зеркального отражения, для того чтобы максимизировать защиту за счет разнесения в условиях серьезных амплитудных замираний. Однако дополнительное преимущество такого наклона луча вниз, является снижение потерь в антенной развязке, вызванных приходящей прямой волной с неправильным углом прихода из-за влияния субрефракции [Olsen, 1989 г.]. Как замечено в Рекомендации МСЭ-R P.530 предельный уровень при проектировании составляет 3 дБ, для того чтобы избежать уменьшения уровня прямого сигнала (обычно приходящего с правильного углом прихода в условиях многолучевости) на антенне с сильным наклоном луча вниз, в частности, когда основное зеркальное отражение расположено перед антенной.

Недостатком направления луча одной антенны вниз является то, что появляются существенные уровни частотно-избирательных замираний и искажений, которые, как известно, будут больше этого луча, потому что повышается уровень многолучевых замираний, приходящих от направления пути распространения [Valentin *и др.*, 1989 г. и 1990 г. и Vergeres *и др.*, 1990 г.]. Однако когда такие замирания и искажения появляются в этом луче, маловероятно, что они появятся одновременно и в луче с наклоном вверх. Так произойдет потому, что на луче с наклоном вверх будет существенная разница между прямым сигналом и сигналом с поверхностной многолучевостью. Из-за более частого появления больших уровней замираний и искажений на луче с наклоном вниз, желательно применять переключение способов разнесения, а не их объединение.

Решение наклонить вниз луч одной антенны будет вызывать трудности на трассах, где нет явной зеркально отражающей поверхности. Однако следует заметить, что диффузное рассеяние от поверхности будет появляться на всех трассах и что рассеянные сигналы также могут быть повышены по уровню в то же самое время, когда прямой сигнал подвергается глубокому замиранию из-за расширения луча. Таким образом, если диффузно рассеянные сигналы достаточно большие, существует вероятность больших замираний и искажений. Также существуют некоторые основания того, что может появляться многолучевость от направления пути распространения, как результат отражения от слабого слоя, вызывающего субрефракцию, на поверхности [Segal, 1999 г.].

Направление такого отражения можно вычислить наложением кривой регрессии на профиль трассы или элемент профиля трассы и принимая, что от нее существует зеркальное отражение. Уравнения для определения точки отражения и угла приведены в Рекомендации МСЭ-R P.530.

#### 8.2.4 Улучшение за счет пространственного разнесения в узкополосных системах

В Рекомендации МСЭ-R P.530 приводится общее уравнение для прогнозирования коэффициента улучшения  $I$  за счет пространственного разнесения в узкополосных системах. Данное уравнение в целом основывается на эмпирическом подборе данных из банка данных МСЭ-R (см. Рекомендацию МСЭ-R P.311) и использует подход, разработанный с учетом больших различий в амплитудных замираниях, появляющихся в разных климатических районах [Hosoya, 1991 г.].

Другое, более простое уравнение прогнозирования [МККР, 1986–1990 г.], которое было найдено, дает результаты, по точности приближающиеся к тем, что даны в Рекомендации МСЭ-R P.530:

$$I = 1 + 1,3 \times 10^{-5} (S f)^{1,3} \cdot d^{1,5}/p, \quad (126)$$

где:

- $p$ : процент времени, в течение которого превышает глубину замирания  $A$  (дБ),
- $S$ : вертикальное разнесение центров приемных антенн (м),
- $f$ : частота (ГГц),
- $d$ : длина трассы (км).

Данное уравнение основано на данных при параметрах диапазона  $2,1 < f < 6,2$  ГГц,  $50 < d < 240$  км,  $63 < S/\lambda < 270$ , где  $\lambda$  длина волны. Дальнейшая разработка данного подхода обсуждается в другом месте [Boithias, 1990 г.].

Результаты испытаний по этим двум методам и некоторым другим, использующим данные из банка данных МСЭ-R, приведены в Hosoya [1991 г.].

#### 8.2.5 Частотное разнесение

Признавая, что систем с частотным разнесением обычно нужно избегать, Рекомендация МСЭ-R P.530 приводит пошаговую процедуру для определения частотного разнесения в таких системах, когда это необходимо или возможно. Первая часть процедуры приводит оптимальное минимальное частотное разнесение, а также возможные более широкие оптимальные частотные разнесения для главного и резервного каналов на трассах с явными поверхностными зеркальными отражениями. Это максимизирует вероятность того, что самая существенная волна от отраженной поверхности будет совпадать по фазе с прямой волной на одной частоте, в то время как она не будет совпадать по фазе с другой частотой, где появляются глубокие замирания. Другая часть, применимая на трассах без отражений от поверхности, основана на вычислении коэффициента улучшения из уравнения (107) в Рекомендации МСЭ-R P.530.

Как замечено в этой Рекомендации, оптимально спроектированная система с частотным разнесением не предоставляет такую защиту, как подобная оптимально спроектированная система с пространственным разнесением. Последняя система полностью защищена в силу разности фаз между сигналами в основном и резервном каналах, плюс наличие дополнительной защиты против элемента амплитудного замирания, возникающего из-за потерь при расширении луча прямого сигнала, как результат вертикального разнесения антенн. В особенности это справедливо, если просвет трассы разнесенной антенны уменьшен и основан на процедуре из п. 2.2.2.2 Рекомендации. В принципе, пространственное разнесение должно также предоставлять большую защиту против атмосферной многолучевости.

##### 8.2.5.1 Коэффициент улучшения за счет пространственного разнесения в узкополосных системах 1 + 1

Существует немного доступных данных, которые позволяют разработать и проверить типичное уравнение прогнозирования для коэффициента улучшения за счет пространственного разнесения в узкополосных системах 1 + 1.

Следующие, обычно используемые уравнения для сухопутных линий, по крайней мере, тех, на которых нет доминирующих отражений от земли, были разработаны на основе более ранних данных [Barnett, 1970 г. и Vigants, 1975 г.]:

$$I = (0,8/f/d) (\Delta f/f) 10^{A/10}, \quad (127)$$

где:

- $f$ : частота несущей диапазона (ГГц),
- $d$ : длина трассы (км),
- $(\Delta f/f)$ : соотношение частотного разнесения в процентах,
- $A$ : глубина замираний (дБ).

Это уравнение применяется только для следующих диапазонов параметров:

$$2 \leq f \leq 11 \text{ ГГц}$$

$$30 \leq d \leq 70 \text{ км}$$

$$\Delta f/f \leq 5\% .$$

Экстраполяция может привести к ошибкам. Уравнение считают действительным, только при  $I \geq 5$ .

Другие уравнения прогнозирования, выведенные из сочетания более ранней базы данных и некоторых дополнительных данных примерно для того же диапазона параметров, как те, что объединены в уравнении (127) приводятся ниже [Boithias *u др.*, 1986 г.]:

$$I = 1 + 0,015 (1/f) (\Delta f/f)^{1,25} \times 10^{A/10} \quad (128)$$

### 8.2.5.2 Коэффициент улучшения за счет пространственного разнесения в узкополосных переключающихся многоканальных системах ( $n + 1$ )

Коэффициент улучшения за счет разнесения для аналоговой системы с частотным разнесением  $n + 1$  может быть вычислен из следующего уравнения, эквивалентного уравнению (128) [Vigants и Pursley, 1979 г.]:

$$I = 160 (f/d\Gamma) \times 10^{A/10}, \quad (129)$$

где:

- $f$ : частота несущей радиочастотного диапазона,
- $\Gamma$ : параметр, зависящий от несущих частот, канального разнесения и изменении в границах замирания канала [Vigants и Pursely, 1979 г.].

Другие параметры имеют свое предыдущее значение.

### 8.2.5.3 Примеры применений

Пример для трассы с существенным отражением от поверхности: рассмотрим 10-километровую линию связи на частоте 4 ГГц от верхней части здания до холма, пересекающего реку, что позволяет получить более чем полную первую зону Френеля отражений на своей поверхности. Антенна на здании – 57 м выше уровня реки и антенна на холме – 86 м выше уровня реки. (Длина и ширина первой зоны Френеля над водной поверхностью составляют 1,84 км и 27 м, соответственно, см. Рекомендацию МСЭ-R P.530).

Минимальный оптимальный частотный разнос приведен в последнем столбце Таблицы 5 для нескольких значений  $k$ , наряду со значениями некоторых других параметров, упомянутых выше в Рекомендации, для того чтобы показать влияние отражающей поверхности (в случае идеально гладкой водной поверхности принимается  $R_r = 1$ ) на замирания, когда происходят некоторые потери при расширении луча прямой волны из-за отражающей структуры атмосферы. Значение замираний  $A_{max}$ ,  $A_{min}$ , и  $A$  является результатом допущения, что прямой сигнал испытывает

замирание  $0,5 \times 4,4 = 2,2$  дБ из-за потерь при расширении луча, и что сигнал от отражающей поверхности увеличивается на некоторое значение (т. е.  $L_{add} = 4,4$  дБ) для ширины луча антенны по половинной мощности  $2,7^\circ$ . ( $A_{min}$  – улучшение полного результирующего сигнала из-за усиливающейся интерференции между прямой и отраженной волнами, значение получено из Рекомендации МСЭ-R P.530 с минусом в круглых скобках, который заменен на плюс. Отрицательные числа подразумевают улучшение.) Принимается, что антенна не наклонена вниз, что конечно даст дополнительную защиту при частотном разнесении. Оптимальное частотное разнесение действует только на трассах с длинами  $d$ ,  $d_1$ , и  $d_2$  и высотами антенн, выше уровня реки  $h_1$  и  $h_2$ , так что этот пример имеет место при работе на любой частоте, если ширина луча антенны по половинной мощности остается такой же.

Как показано в Рекомендации МСЭ-R P.530 минимальный оптимальный частотный разнос составляет примерно 160 МГц, такой разнос может быть достигнут при использовании большого количества частотных планов. Такое разнесение канала 2 позволит избежать одного глубоких замираний, которое происходит на частоте 4 ГГц в основном канале (50,8 дБ при значении  $k > 10$  и  $L_{add} = 4,4$  дБ), что дает улучшение уровня сигнала в разнесенном канале (около 3,8 дБ для  $L_{add} = 4,4$  дБ), центр которого может находиться около 4,16 ГГц или 3,84 ГГц.

Если длина трассы 30 км вместо 10 км, минимальный оптимальный частотный разнос составит 692 МГц для  $k = 4/3$ . В принципе, чересполосное разнесение с разнесенным каналом на частоте 6,076 ГГц (т. е. минимальный оптимальный частотный разнос в три раза больше, как указано в Рекомендации МСЭ-R P.530) может защитить от многолучевых замираний, вызванных потерями при расширении луча прямого сигнала, объединенных с отражением от поверхности.

ТАБЛИЦА 5

**Значения минимального оптимального частотного разноса и другие различные значения для коэффициента  $k$**

$k$	$d_1$ (км)	$d_2$ (км)	$D$	$\rho$	$\rho_{eff}$	$L_s$ (дБ)	$A_{max}$ (дБ)	$A_{min}$ (дБ)	$A$ (дБ)	$\Delta f$ (МГц)
0,5	4,04	5,96	0,948	0,794	0,794	2,31	45,9	-3,8	-2,4	171,3
1	4,01	5,99	0,974	0,788	0,788	2,27	41,4	-3,8	-3,0	161,8
1,33	4,01	5,99	0,980	0,787	0,787	2,26	44,7	-3,8	-3,7	159,5
3	3,99	6,01	0,991	0,784	0,784	2,24	48,7	-3,8	2,2	155,8
5	3,99	6,01	0,995	0,784	0,784	2,24	49,8	-3,8	9,3	154,7
10	3,99	6,01	0,997	0,783	0,783	2,24	50,8	-3,8	49,6	153,8
100	3,99	6,01	1	0,782	0,782	2,23	51,8	-3,8	10,1	153,1
$1,0 \times 10^9$	3,99	6,01	1	0,782	0,782	2,23	52,0	-3,8	9,2	153,0

**Пример для трассы без явного поверхностного отражения:**

Рассмотрим трассу 30 км на частоте 4 ГГц с границей глубоких ослаблений 40 дБ. Если 80 МГц – желаемый частотный разнос в данной системе, коэффициент улучшения при неселективных замираниях составит  $I_{ns} = 133,3$  при использовании Рекомендации МСЭ-R P.530. Это значение также может быть вставлено в метод из Рекомендации МСЭ-R P.530 для получения прогнозирования сбоя. Если прогнозируемый сбой слишком большой, обоснованно может использоваться больший частотный разнос. Например, разнос 160 МГц дает  $I_{ns} = 266,7$ .

### 8.2.6 Коэффициент улучшения за счет поляризационного разнесения в широкополосных системах

Использование основного канала частотного спектра дает значительную важность при влиянии разнесения и его определения. Особенности использования переключателей  $(n + m)$  требуют довольно точного выбора каналов прогнозирования  $m$ , как функции их частоты в диапазоне, и их поляризации.

Измерения показали, что замирания, произошедшие при средней мощности в 2 каналах на совпадающих частотах (V и H) чрезвычайно хорошо коррелированы для значений замираний до, по крайней мере, 25 дБ. Таким образом, улучшение вследствие поляризационного разнесения, главным образом связано с тем фактом, что дисперсии в 2 каналах на совпадающих частотах не коррелированы.

**8.2.7 Относительные достоинства методов разнесения и их комбинаций**

Одним из основных преимуществ пространственного и углового разнесения перед частотным разнесением является то, что они способствуют более экономичному использованию спектра.

Сравнение пространственного и углового разнесения все еще находится на ранней стадии. Очевидное преимущество одиночных многолучевых антенн с пространственно-угловым разнесением состоит в их уменьшенной стоимости, уменьшенной нагрузке на мачту и их эксплуатации на мачте, которая будет слишком низкой для пространственного разнесения. В показателях, относящихся к цифровым линиям связи, видно, что нормальная конфигурация пространственного разнесения может давать наибольшее улучшение для линий, где доминируют сбои в работе вследствие повышенных амплитудных замираний, а конфигурация с угловым разнесением может дать наибольшее улучшение для линий, где доминируют сбои в работе вследствие повышенных искажений [Lin *и др.*, 1988 г.; Alley *и др.*, 1987 г.; Valentin *и др.*, 1989 г. и Mohamed *и др.*, 1989 г.].

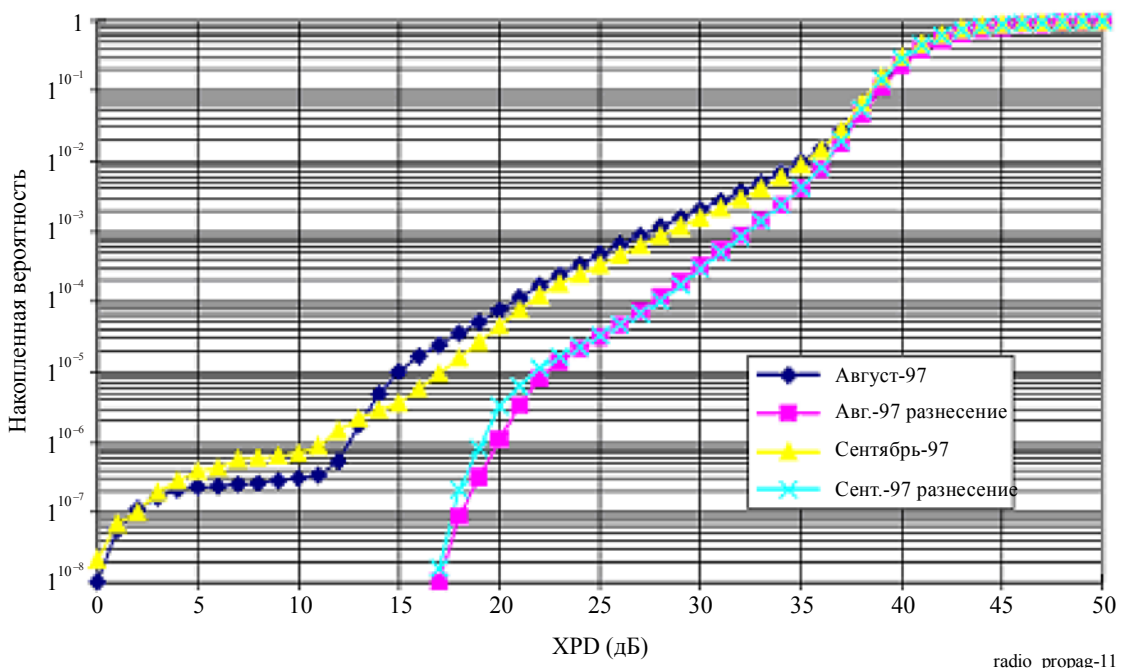
В другие экспериментах рассматривались комбинации различных методов разнесения. Были значительно улучшены статистические данные единичных частотных замираний, XPD, и разные внутрисполосные мощности путем комбинирования пространственного и углового разнесения, когда верхняя антенна не была наклонена вниз, но была наклонена нижняя антенна. Было также подтверждено, что разнесение между не наклоненным лучом и лучом, направленным к волне, отраженной от морской поверхности, эффективно для уменьшения замираний на трассах, где существует стационарная сильно отраженная волна и довольно часто появляется луч поверхностного распространения [Sasaki *и др.*, 1987 и Satoh *и др.*, 1989 г.].

**8.3 Методы разнесения для облегчения уменьшения в XPD**

Пример улучшения, полученного при кроссполяризационной избирательности с использованием разнесения, приведен на Рисунке 11. Он показывает измерения в течение наихудшего месяца года на частоте 4 ГГц и линии длиной 122,4 км в Швейцарии [Thorvaldsen, 2000 г.].

РИСУНОК 11

Улучшение кроссполяризации избирательности при использовании разнесения



## Справочные документы

- ALLEY, G. D., BIANCHI, C. H. and ROBINSON, W. A. [1992] Angle diversity and space diversity experiments on the Salton/Browley hop. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 40, 2, p. 440-454.
- ALLEY, G. D., PENG, W. C., ROBINSON, W. A. and LING, E. H. [1987] The effect on error performance of angle diversity in a high capacity digital microwave radio system. *IEEE GLOBECOM*.
- BARNETT, W. T. [October 1970] Microwave line-of-sight propagation with and without frequency diversity. *BSTJ*, Vol. 49, 8, p. 1827-1871.
- BARNETT, W. T. [1972] Multipath propagation at 4, 6 and 11 GHz. *BSTJ*, Vol. 51, 2, p. 311-361.
- BASHIR, S. O. and McEWAN, N. J. [June 1986] Microwave propagation in dust storms: A review. *Proc. Inst. Elect. Eng.*, Vol. 133, p. 241-247.
- BATTESTI, J. and BOITHIAS, L. [1978] 6th Colloquium on Microwave Communications, Budapest, Hungary.
- BECKMANN, P. and SPIZZICHINO, A. [1963] *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Ed. Pergamon Press.
- BERTOK, E., DERENZIS, G. and DRUFUCA, G. [1977] Estimate of attenuation due to rain at 11 GHz from rain gauge. *CNET*, Issy-les-Moulineaux, France, p. 295-300.
- BOITHIAS, L. [1979] Protection contre les évanouissements dus aux conduits troposphériques sur les liaisons en visibilité. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 34, 9-10, p. 513-514.
- BOITHIAS, L. [1981] Distribution statistiques des niveaux reçus en propagation par trajet multiple troposphérique. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 36, 5-6, p. 329-337.
- BOITHIAS, L. [1983] *Propagation des Ondes Radioélectriques Dans L'Environnement Terrestre*. Ed. Dunod.
- BOITHIAS, L. [1987] *Radio Wave Propagation* (translated by D. Beeson). Ed. McGraw-Hill.
- BOITHIAS, L. [1989] Similitude en fréquences pour l'affaiblissement par la pluie. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 44, 3-4, p. 186-191.
- BOITHIAS, L. [1990] La réception en diversité sur les liaisons de télécommunications. *L'Onde Electrique*, Vol. 70, 1, p. 65-75.
- BOITHIAS, L. and BATTESTI, J. [1967] Protection against fading on line-of-sight radio-relay systems (in French). *Ann des Télécomm.*, Vol. 22, 9-10, p. 230-242.
- BOITHIAS, L., BATTESTI, J. and ROORYCK, M. [1986] Prediction of the improvement due to diversity reception in microwave links. *Proc. MICROCOLL '86*, Budapest, Hungary.
- BULLINGTON, K. [1971] Phase and amplitude variations of multipath fading of microwave signals relating to atmospheric irregularities. *BSTJ*, Vol. 50, p. 2039-2053.
- CAPSONI, C., FEDI, F. and PARABONI, A. [1987] A comprehensive meteorologically oriented methodology for the prediction of wave propagation parameters in telecommunication applications beyond 10 GHz. *Radio Sci.*, Vol. 22, p. 387-393.
- CHU, T. [1974] Rain-induced crosspolarization at centimeter and millimeter wavelengths. *BSTJ*, Vol. 53, 8, p. 1557-1539.
- COST [1996] COST 235 – Radiowave propagation effects on next-generation fixed-services terrestrial telecommunication systems. European Commission, EUR 16992 EN, ISBN 92-827-8023-6.
- CRANE, R. K. [1976] *Refraction effects in the neutral atmosphere. Methods Experimental Physics*, Vol. 12B. M. L. Meeks, Ed. Academic Press.
- CRANE, R. K. [October 1979] Automatic cell detection and tracking. *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, Vol. 17, Issue: 4.
- CRANE, R. K. [1980] Prediction of attenuation by rain. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 28, p. 1717-1733.
- CROMBIE, D. C. [1984] Prediction of multipath fading on terrestrial microwave links at frequencies of 11 GHz and greater. *NATO/AGARD Conf. Proc. CP-346*, p 10/1-8. North Atlantic Treaty Organization, Paris, France.



- DANIELSSON, B. and JOHANSSON, U. [1993] Measured improvements using angle and space diversity on a terrestrial microwave radio link. IEE Conf. Publ. No. 386 on Radio Relay Systems, p. 215-220.
- DERENNES, M. [1979] Etude statistique sur des trajets multiples. Note techniques CNET-TCR/APH/60. Centre national d'études des télécommunications, Issy-les-Moulineaux, France.
- DI ZENOBIO, D., SANTELLA, G., CANDEO, S. and MANDICH, D. [1992] Angle and Space Diversity: Experimental Comparison. Conf. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'92), Conf. Rec., Orlando, United States of America, p. 1851-1857.
- DISSANAYAKE, A. and ALLNUTT, J. E. [1992] Interpretation of radiometric measurements of sky-noise in terms of path attenuation. Proc. ICAP 1991, p. 374-378.
- DOMBEK, K. P. [1986] Reduction of multipath interference by adaptive beam orientation. Proc. European Conf. on Radio-Relay Systems, p. 400-106.
- DRUFUCA, G. [1974] Rain attenuation statistics for frequencies above 10 GHz from rain gauge observations. *J. Rech. Atmos.*
- FEDI, F., MERLO, U., and MIGLIORINI, P. [1977] Effect of the rain rate profile along a path on rain induced attenuation. Proc. URSI Open Symposium on Propagation in Non-ionised Media, La Baule, France.
- FEHLHABER, L. [1976] Influence of the path geometry on fading on line-of-sight radio-relay paths (in German). *Techn. Ber. FTZ*, A 455 TBr 59.
- FIMBEL, J. and JUY, M. [April 28-May 6, 1977] Differential attenuations at 13 GHz over 53 km – Comparison with simultaneous measurements at 20.5 GHz. Proc. Union Radio Scientifique Internationale, Open Symposium, La Baule, Loire-Atlantique, France.
- GARCIA LOPEZ, J. A. and PEIRO J. [1983] Simple rain attenuation prediction technique for terrestrial radio links. *Electron. Lett.*, Vol. 19, p. 879-881.
- GAVZILINA, V. D., KALININ, A. I., DADENENKO, L. V., PANOVA, R. K., SVJATOGOZ, V. V. and UDINA, T. A. [1986] The influence of multipath propagation on the performance characteristics of line-of-sight radio relay channels (in Russian). NIIR Proc., N1.
- GHOBRIAL, S. I. and SHARIEF, S. M. [April 1987] Microwave attenuation and cross polarization in dust storms. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-35, p. 418-425.
- GIBBINS, C. J. and WALDEN, C. J. [2003] A study into the derivation of improved rain attenuation regression coefficients. Radiocommunications Agency Report No. AY4359, available from <http://www.radio.gov.uk/topics/research/research-index.htm>.
- GILOI, H. G. [1979] Diffraction phenomena during multipath. AGARD Conf. Proc. No. 269, p. 32-1-32-14.
- GOSSARD, E. E. [1977] Refractive index variance and its height distribution in different air masses. *Radio Sci.*, **12**, p. 89-105.
- GUTTEBERG, O. [1983] Low elevation propagation in high-latitude regions. Telenor R&D Report No 7/83.
- HARDEN, B. N., NORBURY, J. and WHITE A. [1978] Use of a lognormal distribution of raindrop sizes in millimetric radio attenuation studies. IEE Conf. Publ 169, Part 2, p. 87-91.
- HARTMAN, W. J. and SMITH, D. [1977] Tilting antennas to reduce line-of-sight microwave link fading. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 25, **5**, p. 642-645.
- HAUTFEUILLE, M., BOYLE, A. W., TIMMERS, A. G. W., and SHANNON, J. D. [1980] Duct fading – is Senegal an isolated case? *Telecomm. J.*, Vol. 47, **VIII**, p. 517-525.
- HENDRY, A., ANTAR, Y. M. M., SCHLESACK, J. J. and OLSEN, R. L. [1981] Melting layer attenuation at 28.6 GHz from simultaneous Comstar beacon and polarisation diversity data. *Electron. Lett.*, **17**(5), p. 190-191.
- HOSOYA, Y. [1991] A unified prediction method for space diversity improvement in received power on microwave links. *Electronics and Communications in Japan*. Part 1, Vol. 74, **9**, p. 73-81. Translated from Denshi Joho Tsushin Gakkai Ronbunshi, Vol. 73-B-II, **12**, December 1990.
- JAIN, Y. M. and WATSON, P. A. [1985] Attenuation in melting snow on microwave- and millimetre-wave terrestrial radio links. *Electron. Lett.*, **21**(2).

- KALININ, A. I. [1979] Rasprostranenie radiovoln na trassakh nazemnykhi kosmicheskikh radioliny (Propagation on terrestrial and space links). *Sviaz*, Moscow, USSR.
- KARL, H. and PERSSON, R. [1998] The Planning and Engineering of Radio Systems. *K&K Engineering*, Stockholm, Sweden.
- KHARADLY, M., OWEN, N. VAN DER STAR, J., MICHELSON, D. and ENEGREN, T. [1983] Observations of abnormal microwave propagation phenomena during melting layer conditions. Proc. of International Conference on Antennas and Propagation (ICAP), Norwich United Kingdom.
- KHARADLY, M. M. Z. and OWEN, N. [1988] Microwave propagation through the melting layer at grazing angles of incidence. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, 36(8).
- KOBAYASHI, T. [July 1977] Degradation of cross-polarization isolation due to rain. *Radio Res. Lab. J.*, Vol. 24, p. 101-107.
- KUZNETSOV, G. G., WALDEN, C. J. and HOLT, A. R. [2000] Attenuation of microwaves in sleet. Final Report to the Radiocommunication Agency AY 3564, Dep. of Mathematics, University of Essex, Colchester (Available from <http://www.ofcom.org.uk/>).
- LAM, W. I. and WEBSTER, A. R. [1985] Microwave propagation on two line-of-sight overseas paths. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 33, 5, p. 510-516.
- LIN, S. H. [1971] Probability amplitude analysis of statistical behaviour of fading signal envelope. *BSTJ*, Vol. 50, p. 3211-3270.
- LIN, S. H. [1975] A method for calculating rain attenuation distributions on microwave paths. *BSTJ*, 54, p. 1051-1086.
- LIN, S. H., LEE, T. C. and GARDINA, M. F. [1988] Diversity protections for digital radio – A review. SMBO Int. Microwave Symp. Proc., Vol. II, p. 1175-1182.
- MARTIN, L. [1983] Rates of change of propagation medium transfer functions during selective fading. Proc. URSI (Commission F) International Symposium on wave propagation and remote sensing, Louvain-la-Neuve, Belgium.
- MARTIN, L., GIRAUD, B. and BOUIDENE, A. [1993] General computation method of outage time for digital radio links. *Electron. Lett.*, Vol. 29, 22, p. 1913-1914.
- McEWAN, N. J., BASHIR, S. O., CONNOLLY, C. and EXCELL, D. [1985] The effect of sand and dust particles on 6/4 and 14/11 GHz signals on satellite-to-Earth paths. University of Bradford, Report 379.
- MEDHURST, R. [1965] Rainfall attenuation of centimeter waves: Comparison of theory and measurement. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, p. 550- 564.
- MILLER, A. R., BROWN, R. M. and VEGH, E. [1984] New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations. *Proc. IEE*, Vol. 131, Pt. H, 2, p. 114-116.
- MINKIN, V. M. and NADENENKO, L.V. [1998] Influence of propagation conditions on the bringing into service procedure for digital radio-relay systems. Proc. of 6th ECRR' 98, Bergen, Norway.
- MISME, P. and FIMBEL, J. [1975] Theoretical and experimental determination of rain-induced attenuation on a radioelectric path. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 30, p. 149-158.
- MOHAMED, S. A. RICHMAN, G. D., and HUIISH, P. W. [198] Results of angle diversity trials by British Telecom. Proc. 2nd European Conference on Radio-Relay Systems.
- MORITA, K. and HIGUTI, I. [1978] Statistical Studies on Rain Attenuation and Site Diversity Effect on Earth to Satellite Links in Microwave and Millimeter Wavebands. IEICE TRANS. (1976-1990), Vol. 61, 6, p. 425-432.
- MORITA, K. SHIMBA, M. and AKEYAMA, A. [May 1974] Radio propagation characteristics due to rain at 20-GHz band. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 22, 5, p. 507-509.
- MOUPFOUMA, F. [1984] Improvement of a rain attenuation prediction method for terrestrial microwave links. *IEEE Tran. Ant. Prop.*, Vol. 32, p. 1368-1372.
- NADENENKO, L.V. [1981] Raschet trass radioreleinykh liny pryamoi vidimosti (Calculations for line-of-sight radio relay paths). Spravochnik po radioreleinoi svyazi. *Radio I Sviaz*, Moscow, Russian Federation.

- NADENENKO, L. V. and SVIATOGOR, V. V. [1972] Dlitelnost zamiraniy signala na intervalakh radioreleynikh liniy pryamoy vidimosti (Duration of signal fading in the hops of line-of-sight radio-relay systems) (in Russian). *Elektrosviaz*, 5, p. 6-10.
- NISHITSUJI, A. [1971] Method of calculation of radio-wave attenuation in snowfall. *Electronics and communications in Japan*, 54-B(1).
- NOWLAND, W. L., OLSEN, R. L. and SHKAROFSKY, I. P. [October 1977] Theoretical relationship between rain depolarisation and attenuation. *Electron. Lett.*, Vol. 13, 22, p. 676-678.
- OLSEN, R. L. [1981] Cross-polarisation during precipitation on terrestrial links. *Radio Sci.*, Vol. 16, 5, p. 761-779.
- OLSEN, R. L. [1989] The role of atmospheric stratification and surface effects in multipath propagation over terrestrial line-of-sight links: A review of some recent results. SMBO Proc. Int. Microwave Symp., São Paulo, Brazil, p. 401-408.
- OGUCHI, T. [1973] Attenuation and phase rotation of radio-waves due to rain: Calculation of 19.3 and 34.8 GHz. *Radio Sci.*, Vol. 8, p. 51-58,
- OGUCHI, T. [1977] Scattering properties of Pruppacher-and-Pitter form raindrops and cross-polarization due to rain: calculations at 11,13, 19-3 and 34-8 GHz. *Radio Sci.*, 12, p. 41-51.
- OGUCHI, T. and HOSOYA, Y. [1974] Differential attenuation and differential phase shift of radio waves due to rain: Calculations of microwave and millimeter wave regions. *J. Rech. Atmos.*, Vol. 8, p. 121-128.
- OLSEN, R. L. [September-October 1981] Cross polarization during precipitation on terrestrial links: A review. *Radio Sci.* Vol. 16, p. 761-779.
- OLSEN, R. L. [1989] The role of atmospheric stratification and surface effects in multipath propagation over terrestrial line-of-sight links: A review of some recent results. Proc. SBMO International Microwave Symposium, São Paulo, Brazil, p. 401-408.
- OLSEN, R. L. and SEGAL, B. [1992] New techniques of predicting the multipath fading distribution on VHF/UHF/SHF terrestrial line-of-sight links in Canada. *Can. J. Elect. & Comp. Eng.*, Vol. 17, 1, p. 11-23.
- OLSEN, R. L. and TJELTA, T. [1999] Worldwide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial L.O.S. links: Background and results of tests. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 47, 1, p. 157-170.
- OLSEN, R. ROGERS, D. and HODGE, D. [1978] The aRb relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 26, 2, p. 318-329.
- OLSEN, R. L., MARTIN, L. and TJELTA, T. [1987] A review of the role of surface reflection in multipath propagation over terrestrial microwave links. Proc. of NATO/AGARD Symposium on Terrestrial propagation characteristics in modern systems of communications, surveillance, guidance and control, No. CP407, p. 2/1-23.
- OLSEN, R. L., TJELTA, T., MARTIN, L. and SEGAL, B. [January 2003] Worldwide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial L.O.S. links: comparison with regional techniques. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 51, 1, p. 23-30.
- PEARSON, K. W. [1965] Method for the prediction of the fading performance of a multisection microwave link. Proc. Inst. Elec. Eng., Vol. 112, p. 1291-1300.
- PERONI, B. and FEDI, F. [1974] The calculation of the hop length of digital radio relay systems at frequencies above 10 GHz. *Alta Frequenza*, Vol. 43, p. 634-639.
- PRASAD, M. V. S. N., DUTTA, H. N., SARKAR, S. K. and REDDY, B. M. [1991] Fading reduction in microwave LOS links using antenna beam tilting techniques. *Radio Sci.*, Vol. 26, 3, p. 751-758.
- PRUPPACHER, H. R. and BEARD, K. V. [1970] A wind-tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 96, p. 247-256.
- PRUPPACHER, H. R. and PITTER, R. L. [1971] A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops. *Atmos. Sci.*, 28, p. 86-94.
- RANA, D., WEBSTER, A. R. and SYLVAIN, M. [1992] Statistical characterization of line-of-sight microwave links. *Radio Sci.*, Vol. 27, 6, p. 783-796.
- RANA, D., WEBSTER, A. R. and SYLVAIN, M. [1993] Origin of multipath fading on a terrestrial link. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 48, 11-12, p. 557-566.

- RANA, D., WEBSTER, A. R. and SYLVAIN, M. [1995] Surface reflection at low-angle propagation *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 43, 7, p. 639-652.
- ROORYCK, M. and BATTISTI, J. [1976] Experimental investigation of a link at 13 GHz on 53 km: Attenuation and cross polarization. *ESA Probl. of Space and Terrest. Microwave Propagation*, p. 217-227.
- RUMMLER, W. D. [10-14 June 1978] A multipath channel model for line-of-sight digital radio systems. *IEEE International Conference on Communications (ICC'79)*, Boston, United States of America, Vol. 2, p. 32.2.1-5.
- RYDE, J. W. and D. RYDE [1945] Attenuation of Centimetre and Millimetre Waves by Rain, Hail, Fogs, and Clouds. Rpt. No. 8670, Research Laboratory of the General Electric Company, Wembley, England.
- SALEH, A. A. M. and VALENZUELA, R. A. [1987] A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation. *IEEE J. Selected Areas Comm.*, Vol. 5, 2, p. 128-137.
- SALOUS, S. and BAJJ, N. [1998] Urban wideband measurements at 1.8 GHz with different chirp bandwidths. 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 1, **18-21**, p. 697-701.
- SASAKI, O., HOSOYA, Y. and YOSHIKAWA, M. [1987] A tilted-beam diversity reception system to reduce line-of-sight microwave fading. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs.*, Vol. 70-B, **10**, p. 1251-1253.
- SASAKI, O., MORITA, K. and KIKUSHIMA, M. [1976] 19 GHz rain attenuation characteristics on four tandem links. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 24, 2, p. 216-220.
- SASAKI, O., SATOH, A. and HOSOYA, Y. [1991] Multiple diversity reception techniques. *NTT Rev.*, Vol. 3, **1**, p. 66-74.
- SATOH, A. and SASAKI, O. [1989] Tilted-beam-, beam-width- and space-diversity improvements on various paths. *IEEE Global Telecommunications Conf. (Globecom'89)*, p. 2.3.1.
- SATOH, A., SASAKI, O. and HOSOYA, Y. [1989] Improvement of in-band dispersion by beam tilting on radio links with strong ground reflection. *Proc. Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP'89)*, p. 1073-1076.
- SAUNDERS, M. I. [1971] Cross polarisation at 18 and 30 GHz due to rain. *IEEE Trans.*, Vol. AP-19, p. 273-277.
- SCHIAVONE, J. A. [1981] Prediction of positive refractivity gradient for line-of-sight microwave radio paths. *BSTJ*, Vol. 60, **6**, p. 803-822.
- SEGAL, B. [1979] High-intensity rainfall statistics for Canada. *Commun. Res. Centre, Ottawa, ON, Canada*, 1329-E.
- SEGAL, B. [1982] Rain Attenuation Statistics for Terrestrial. Microwave Links in Canada. *Comm. Res. Centre. Rep. No. 1351-E, Ottawa, Canada*, p. 14.
- SEGAL, B. [1999] Multipath propagation mechanisms deduced from tower-based meteorological measurements. *Proc. First International Workshop on Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ku-Band and Above, European Space Agency, Report No. 146*, p. 13-18, Noordwijk (The Netherlands).
- SETZER, J. E. [1970] Computed transmission through rain at microwave and visual frequencies. *BSTJ*, Vol. 49, p. 1873-1892.
- SHAFI, M. [April 1987] Statistical Analysis/Simulation of a Three Ray Model for Multipath Fading with Applications to Outage Prediction, *IEEE Journal on Selected Areas on Communication*, Special issue on Advances in Digital Communications.
- SILVA MELLO, L. A. R., GARCIA, N. A. P. and PONTES, M. S. [2005] Measurements and Prediction of Differential Rain Attenuation in Converging Links. *Electron. Lett.*, London, Vol. 41, **17**, p. 942-942.
- STEPHANSEN, E. and MOGENSEN, G. [1979] Experimental Investigation of Some Effects of Multipath Propagation on a Line-of-Sight Path at 14 GHz. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 27, **3**, p. 643-647.
- TAKADA, M. and NAKAMURA, S. [January 1966] Attenuation of 11 Gc Waves by Wet Snowfall. *Rev. Elec. Comm. Labs.*, 14(**1-2**), p. 27-42.
- TANEM, T. [1988] Forbedring av transmisjonskvaliteten i digital radiolinjesystemer over sjøhopp ved optimal tilting av antennene (in Norwegian). *Telekonikk*, Nr. 2/3. English translation available from author, Telenor, Oslo, Norway.
- TATARSKII, V. I. [1967] *Wave Propagation in the Turbulent Atmosphere*. Nauka, Moscow, Russian Federation.
- THORVALDSEN, P. [2000] Co-channels everywhere. *Proc. of ECRR 2000*.

- THURAI, M. and WOODROFFE, J. M. [1997] Precipitation induced co and cross-polar effects from a 9 km link operating at 38 GHz. Proc. of International Conference on Antennas and Propagation (ICAP), Conf. Publ. No. 436, 2, p. 222-225.
- TJELTA, T., BRÅTEN L. E. and BACON D. [2005] Predicting the attenuation distribution on line-of-sight radio links due to melting snow. Proc. ClimDiff, Cleveland, United States of America.
- TJELTA, T., BRÅTEN L. E. and BREIVIK, T. O. [2006] Predicting the attenuation distribution on line-of-sight radio links due to melting snow. Telenor R&D Scientific. Doc. N 35/2005.
- TJELTA, T., HAYTON, T. G., SEGAL, B. and SALONEN, E. [1998] Correlation of observed multipath occurrence with climatic parameters derived from radiosondes, surface stations, and numerical atmosphere models. Proc. of URSI Commission F Symposium on Climatic Parameters in Radiowave Propagation, Ottawa, Canada, p. 85-92.
- TJELTA, T., NYSETH, A. and LIND, K. [1991] Simultaneous measurements of angle and space diversity improvement on a line-of-sight microwave link in Norway. Proc. 3<sup>rd</sup> European Conf. on Radio Relay Systems (ECRR).
- TJELTA, T. and OLSEN, R. L. [2-5 June 1998] Further development of methods for worldwide prediction of terrestrial radio link multipath fading distributions. Proc. of ECRR'98, Bergen, p. 330-335.
- TJELTA, T., OLSEN, R. L. and MARTIN, L. [1990] Systematic development of new multivariable techniques for predicting the distribution of multipath fading on terrestrial microwave links. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 38, 10, p. 1650-1665.
- TJELTA, T. and TANEM, T. [1992] Measured and predicted enhancement on line-of-sight microwave links. URSI Comm. F Symposium, p. 9.1.1-6.
- VALENTIN, R., GILOI, H. G. and METZER, K. [1989] Space diversity versus angle diversity – Results of system analysis using propagation data. IEEE Int. Conf. Comm. (ICC'89).
- VALENTIN, R., GILOI, H. G. and METZGER, K. [1990] More on angle diversity for digital radio links.
- VALENTIN, R., METZGER, K., GILOI, H. G. and DOMBEK, K. P. [1987] Effects of angle diversity on the performance on line-of-sight digital radio-relay systems. IEEE Global Telcom. Conf. (Globecom'87), p. 1229-1232.
- VERGERES, D., JORDI, P. and LOEMBE, A. [1990] Simultaneous error performance of antenna pattern diversity and vertical space diversity on a 64 QAM-radio link. IEEE Global Telecom. Conf. (GLOBECOM'90), Conf. Rec., Vol. 2, p. 817-82 (see also Bulletin Technique PTT, Swiss PTT, Berne, Switzerland, 1, 28-33, 1991).
- VIGANTS, A [1971] Number and duration of fades at 6 and 4 GHz. *BSTJ*, Vol. 50, p. 815-841.
- VIGANTS, A. [1975] Space-diversity engineering. *BSTJ*, Vol. 54, 1, p. 103-142.
- VIGANTS, A. [1981] Microwave radio obstruction fading. *BSTJ*, Vol. 60, 6, p. 785-801.
- VIGANTS, A. and PURSLEY, M. V. [1979] Transmission unavailability of frequency-diversity protected microwave FM radio systems caused by multipath fading. *BSTJ*, Vol. 58, 8, p. 1279-1796.
- WALDEN, C. J., WILSON C. L., GODDARD J. W. F., PAULSON K. S., WILLIS M. J. and EASTMENT J. D. [2003] A study of the effects of melting snow on communications links in Scotland. Proc. International Conference on Antennas and Propagation (ICAP).
- WATSON, P. A. [September 1976] Survey of measurements of attenuation by rain and other hydrometeors. *Proc IEE*, Vol. 123, 9, p. 863-71.
- WEBSTER, A. R. [1983] Angle-of-arrival and delay times on terrestrial line-of-sight microwave links. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 31, 1, p. 12-17.
- WEBSTER, A. R. [1991] Multipath angle-of-arrival measurements on microwave line-of-sight links. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 39, 6, p. 798-803.
- WEBSTER, A. R., TIEU, T. and WONG, W. [1994] Simultaneous experimental studies of tropospheric microwave propagation. Dept. Electrical Engineering, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, Report CRC-CR-94-003.
- YAMADA, M., KARASAWA, Y. and YASUNAGA, M. [1987] An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz. *Radio Sci.*, Vol. 22.

**Документы МСЭ-R**

Рекомендация МСЭ-R P.1510 (2001 г.) Средняя годовая температура на поверхности.

Рекомендация МСЭ-R P.311-10 (2001 г.) Сбор, представление и анализ данных при исследовании тропосферного распространения.

Рекомендация МСЭ-R P.581-2 (1990 г.) Концепция "наихудшего месяца".

Рекомендация МСЭ-R P.618-8 (2003 г.) Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос.

Рекомендация МСЭ-R P.676-5 (2001 г.) Ослабление в атмосферных газах.

Рекомендация МСЭ-R P.835-3 (1999 г.) Эталонная стандартная атмосфера.

Рекомендация МСЭ-R P.836-2 (2001 г.) Водяной пар: плотность над поверхностью и общий столбчатый объем.

Рекомендация МСЭ-R P.837-4 (2003 г.) Характеристики осадков, используемые для моделирования распространения радиоволн.

Рекомендация МСЭ-R P.838-3 (2005 г.) Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования.

Рекомендация МСЭ-R P.839-3 (2001 г.) Модель высоты слоя дождя, используемая в методах прогнозирования.

Рекомендация МСЭ-R P.840-3 (1999 г.) Ослабление за счет облаков и тумана.

Рекомендация МСЭ-R P.841-2 (2001 г.) Преобразование годовой статистики в статистику наилучшего месяца.

Рекомендация МСЭ-R P.676-3 (1997 г.) Ослабление в атмосферных газах.

МСЭ-R [2002 г.] Разработка модели комбинированных ослаблений в дожде и дожде со снегом. Документ 3M/62E.

МСЭ-R [1996 г.] Справочник по цифровым радиорелейным системам. Бюро радиосвязи, Женева.

МСЭ-R [1996 г.] Справочник по радиометеорологии. Бюро радиосвязи, Женева.

CCIR [1986–1990 г.] Док. 5/287 (Франция).

## ЧАСТЬ 2

### ТРОПОСФЕРНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

#### 1 Введение

Данная часть Справочника рассказывает о планировании и проектировании тропосферных радиорелейных систем. Основанная на Рекомендациях МСЭ-R P.526 и МСЭ-R P.617, она предоставляет базовую информацию о различных методах прогнозирования потерь за счет дифракции и тропосферного рассеяния с использованием данных и других материалов из этих Рекомендаций. Она включает краткое представление основных математических и эмпирических методов и ссылки на любые связанные материалы.

#### 2 Типичные применения

Тропосферные радиолинии характеризуются очень длинными трассами, обычно от 100 км до почти 1000 км. Это дает очень сильное ослабление на трассе, что может компенсироваться использованием очень большой излучаемой мощностью, большими коэффициентами усиления антенн и чувствительными маломощными приемниками. Дополнительно в некоторых случаях может потребоваться разнесение. Используемые диапазоны частот: УВЧ и нижняя часть диапазона СВЧ.

По сравнению с радиолиниями прямой видимости, тропосферные системы могут, в некоторых случаях, привести к более выгодному экономическому решению из-за возможности не использовать ретрансляторы. Эта особенность особенно полезна в случаях трудных рельефов, таких как связь между удаленными участками в сельских районах, связь между материком и удаленными островами, или между островами, и связь между берегом и нефтяными платформами далеко в море.

Тропосферные линии имеют хорошую защиту в случае диверсии или бедствия, так как для защиты имеют несколько ретрансляторов. Это является главной причиной большой заинтересованности в этих системах военных ведомств.

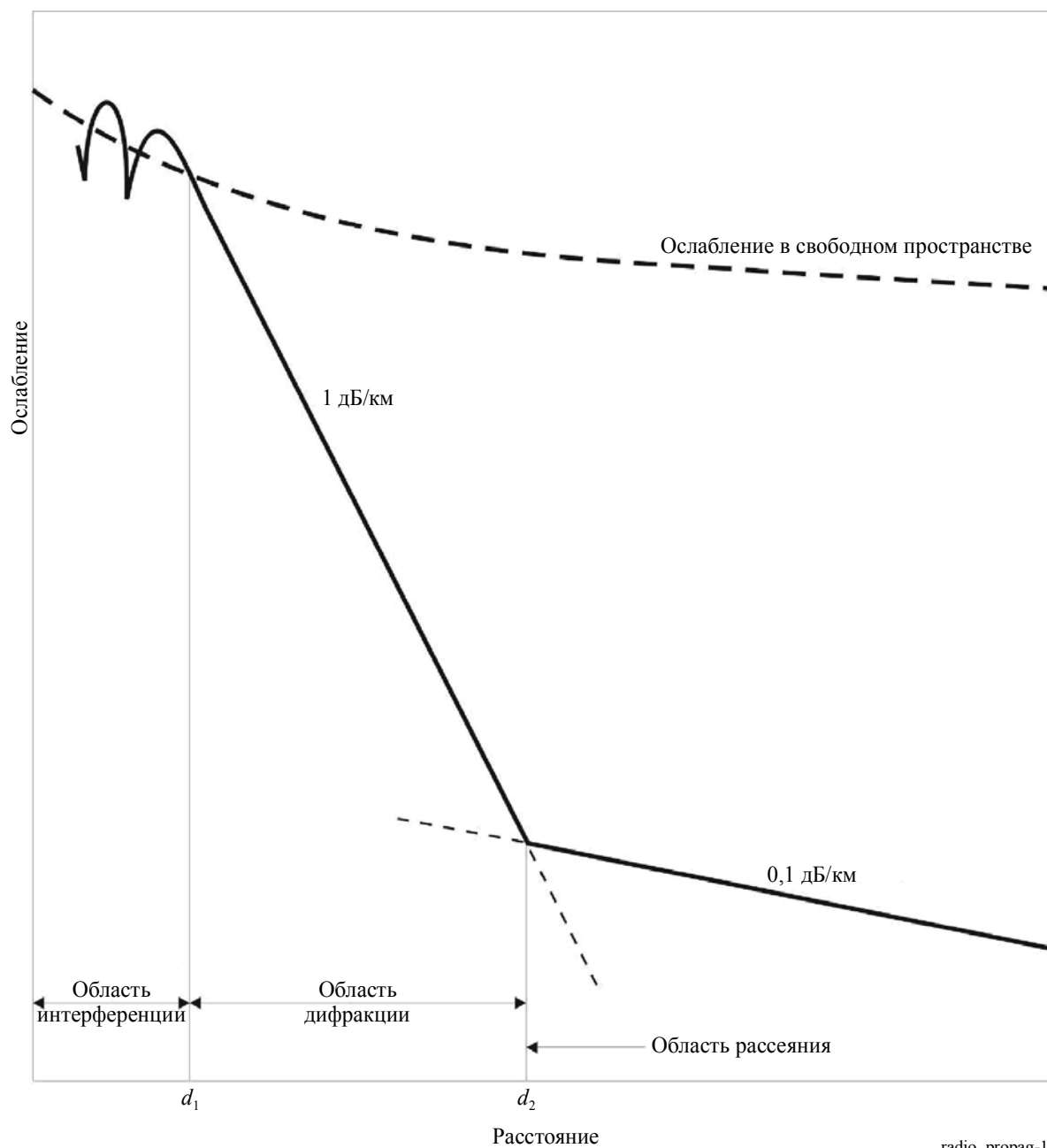
Особенной характеристикой тропосферных линий является проблемы передачи, искажения, которые ограничивают полную полосу пропускания и емкость трафика, в этом и состоит специфика характеристик тропосферных радиолиний. Эта особенность была причиной исключения таких систем от использования в современных телефонных сетях общего пользования, за исключением нескольких развивающихся стран. В будущем основное применение тропосферных радиолиний, как ожидается, будет в правительственных сетях и, в некоторой степени, в частных сетях электросвязи, например, нефтяной отрасли. Большая часть планируемых новых сетей проектируется, для того чтобы нести цифровой трафик. Поэтому особое внимание должно уделяться управлению проблемами искажений.

#### 3 Основная теория

Процесс тропосферного распространения происходит над трассами, продолжающимися за пределами нормального радиогоризонта. Существует только две постоянных при процессе тропосферного распространения на частотах выше 30 МГц: дифракция и тропосферное рассеяние. Ослабление, связанное с этими явлениями на разных расстояниях показано на Рисунке 12.

Нужно отметить, что только за пределами горизонта дифрагированное поле имеет быстрое экспоненциальное падение порядка 1 дБ/км на 1 ГГц, в то время как поле рассеяния падает в окружности на 0,1 дБ/км. Хотя это и не рассматривается в методах, обсуждаемых здесь, на Рисунке 12 также показан район интерференции, где происходит колебание в принимаемом поле вследствие суммирования фаз прямого и отраженного луча.

РИСУНОК 12  
Области интерференции, дифракции и рассеяния



radio\_propag-12

### 3.1 Дифракция

Как обсуждалось в п. 3.3 Части 1, если атмосфера имеет достаточную субрефракцию, радиоволны изгибаются по направлению к Земле. Существуют два основных влияния, связанных с этим механизмом: дифракция над кривизной Земли и над неровностями рельефа.

#### 3.1.1 Дифракция над гладкой сферической Землей

Классическое решение влияния дифракции над сферической Землей (гладкой и однородной) приводится в оставшихся выпусках [Vremmer, 1949 г.]. Первые значения из этих выпусков приводят действительное приближение для оценки дифрагированного поля над горизонтом или за его пределами [Bullington, 1947 г. и Rice *и др.*, 1967 г.]. Хотя это решение считается удовлетворительным подходом для многих применений, есть случаи, когда необходимо более точное определение. Одним из примеров является прогнозирование напряженности поля при распространении на трассах, проходящих над сушей и частично над морем.



Для проблемы дифракции над неоднородной Землей полуэмпирическое решение было дано Millington [1949а г.] и решение для интегрального уравнения было также получено при использовании теоремы компенсации [Monteath, 1951 г.]. Численные результаты для двух участков и трех участков гладкой Земли представлены в [Wait, 1974 г.]. Согласие с экспериментальными данными в прогнозировании полученного влияния на границе земля-море [Millington, 1949 г. и Millington и другие, 1950 г.] является важным подтверждением этой теории.

### 3.1.2 Дифракция над изолированными препятствиями

Трасса распространения с общим горизонтом для обоих терминалов может рассматриваться как единичное клиновидное препятствие. Классический подход к решению этой проблемы основан на скалярной теории Френеля–Кирхгофа для оптических систем [Born и Wolf, 1970 г.]. Однако было проверено, что в некоторых случаях величина препятствия влияет на результат, и он получается совершенно отличающийся от прогнозируемого в модели с клиновидным препятствием. Корректировка этого решения была разработана Фоком в 1950 году, который показал наличие двух частей в дифрагированном поле. Одна часть получена из теоремы Френеля–Кирхгофа, а другая – это функция измерения препятствия, соответствующая определенному поправочному коэффициенту. Нужно также отметить, что согласно принципу местного воздействия [Fock, 1965 г.], дифракция над закругленным препятствием не зависит от формы препятствия.

На основе работ Фока была исследована дифракция над цилиндрическим гладким препятствием для углов скольжения [Wait и Conda, 1959 г.]. Через интегральное уравнение, решенное числовыми методами, эти авторы избежали проблемы плохой сходимости рядов для общих областей с прямой видимостью, обычной для других существующих решений. Результаты работ Уэйта и Конда, включающих инженерные формулы и графики для практических применений, были опубликованы в шестидесятых годах [Dougherty и Maloney, 1964 г. и Dougherty и Wilkerson, 1967 г.].

### 3.1.3 Дифракция над множественными препятствиями

Точные решения для случая двух клиновидных препятствий опубликованы много лет назад [Millington и др., 1962 г. и Furutsu, 1963 г.]. Для теоретического решения десяти поднятых клиновидных препятствий требуется числовая оценка множественного интеграла Френеля для величины, равной числу кромок [Vogler, 1982 г.]. Для инженерных целей были предложены методы аппроксимации [Epstein и Peterson, 1953 г.; Deygout, 1966 г. и Giovaneli, 1984 г.], основанные на теории дифракции на единичном крае.

Не существует строгого метода для прогнозирования напряженности поля при влиянии дифракции над несколькими сругленными препятствиями. Было предложено решение для метода Дейгоу [Assis, 1971 г.], использующего упрощенное решение, основанное на предположении, что каждое препятствие можно рассматривать как цилиндр с радиусом, равным радиусу кривизны препятствия на его вершине. Также было рассмотрено решение, использующее процедуру, принятую Воглером [1982 г.] для каскадного расположения цилиндров [Sharples и Mehler, 1989 г.]. Эти авторы используют только первый член бесконечного ряда Воглера, получая результат, подобный тому, что получили Эпштейн и Петерсон [1953 г.], но с корректирующим коэффициентом для связанных потерь при распространении.

В Рекомендации МСЭ-R P.526 представлены два метода вычисления дифракции над множественными препятствиями. В первом методе принимается, что каждое препятствие можно представить в виде цилиндра с радиусом, равным радиусу кривизны на вершине препятствия, причем желательно иметь подробный вертикальный профиль препятствия. Второй метод основан на клиновидных препятствиях. Этот метод основывается на построении Дейгоу, которое применяется максимум для трех кромок препятствий плюс эмпирическая корректировка, полученная из измерений, проводимых на 25 000 трассах в Соединенном Королевстве.

### 3.1.4 Дифракция над пересеченной местностью

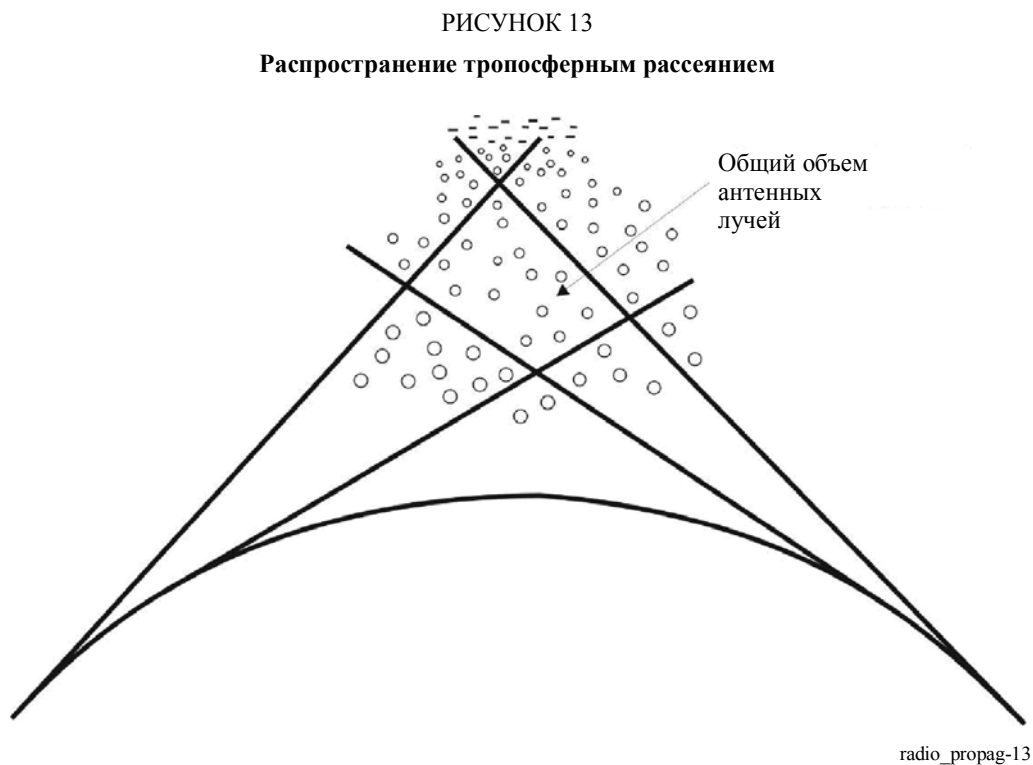
Фундаментальный теоретический подход к дифракции над поверхностью с неровностями был разработан [Hufford, 1952 г.], он использует метод интегрального уравнения. Дальнейшая работа в этом направлении была проведена Оттом и Берри [1970 г.] и Оттом [1971 г.]. В их модели рельеф может быть представлен полностью произвольным профилем вдоль большой круговой трассы, при этом электрические свойства Земли могут постоянно меняться. К сожалению, для составления хорошей структуры поверхности в нужном масштабе необходим большой объем памяти компьютера.

Был предложен полуэмпирический метод [Furutsu и Wilkerson, 1970 г. и 1971 г.], для того чтобы оценить прирост, вызванный наличием горного хребта на сферической однородной Земле. Этот метод использует графики "предельный прирост" препятствий, которые определяются асимптотическими значениями теоретических приростов препятствий для бесконечного расстояния распределения на одной стороне препятствия, и конечного расстояния на другой стороне. Подобные результаты были достигнуты при использовании подхода согласования мод [Wait, 1974 г.].

Был разработан численный метод [Assis, 1982 г.], применимый в тех случаях, где рельеф может быть смоделирован как единичное клиновидное препятствие, и поверхность имеет неровную структуру в направлении перпендикулярном плоскости распространения (большая круговая трасса). Измерения в частотном диапазоне от 270 до 330 МГц показывают, что вычисления с клиновидными препятствиями могут в результате дать ошибки в  $\pm 10$  дБ, если не учтены их боковые неоднородности.

### 3.2 Тропосферное рассеяние

В этом механизме, энергия рассеивается от тропосферных неоднородностей в общий объем, который состоит из той части тропосферы, которая видна и передающей и приемной антеннам, как показано на Рисунке 13.



Так как первое доказательство работы этого механизма появилось примерно в 1950 году, то в течение приблизительно 15 лет проводилось большое количество теоретических исследований и происходило много научных обсуждений. Превосходство одной или другой теории никогда не признавалось. Однако был признан главный механизм турбулентного рассеяния и неоднородности слоя рефракции [Friis и др., 1957 г.], а также, что соответствующие процессы обоих явлений могут вести себя, в основном в зависимости от климатических характеристик рассматриваемого географического района. Были разработаны математические модели, описывающие потери при тропосферном рассеянии, основанные на таких параметрах, как масштаб турбулентности и размер слоя. Однако из-за трудности в получении этих параметров из метеорологических измерений, эти модели не использовались в практических применениях. Все же модели могут быть полезны, чтобы изучить частоту и зависимость от расстояния, явление потерь в коэффициенте усиления антенны и т. д. [Du Castel, 1966 г.]. На этой основе использовались механизмы распространения, для того чтобы получить эмпирическую или полуэмпирическую модели для вычисления потерь при передаче.

В настоящее время прогнозирование тропосферного рассеяния на трассах основано на этих эмпирических или полуэмпирических методах. Два метода были опубликованы в 1965 году и использовались как справочные материалы для исследований МСЭ-R в течение более 20 лет. Один из них соответствует упрощенной версии метода Национального бюро стандартов Соединенных Штатов (НБС), впервые опубликованному в мае 1965 года и затем пересмотренному два года спустя [Rice *и др.*, 1967 г.]. Согласно этому методу ежегодные потери передачи имеют вид:

$$L(50) = 20 \log f - 20 \log d + F(\theta) + L_c - G_t - G_r - V(d_e), \quad (130)$$

где  $d$  – расстояние (км),  $f$  – частота (МГц),  $\theta$  (рад) – угол между лучами радиогоризонта в плоскости большого круга, содержащего антенны, для средних атмосферных условий (см. Рисунок 14), и  $G_t$  и  $G_r$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн (дБ), соответственно. Функции  $F(\theta)$  и  $V(d_e)$ , а также определение эффективного расстояния  $d_e$  приведены в [Rice *и др.*, 1967 г.].  $L_c$  – потери в переходе апертура-среда даны в Рекомендации МСЭ-R P.617.

Угол рассеяния  $\theta$  имеет вид:

$$\theta = \theta_e + \theta_t + \theta_r, \quad (131)$$

где  $\theta_t$  и  $\theta_r$  – углы места горизонта передающей и приемной антенн, соответственно. Эти углы могут быть вычислены как:

$$\theta_e = d \times 10^3 / ka \quad \text{мрад}, \quad (132)$$

$$\theta_{t,r} = \frac{h'_{1,2} - h_{1,2}}{d_1} - \frac{d_{1,2} \times 10^3}{ka} \quad \text{мрад}, \quad (133)$$

где:

$d$ : длина трассы (км),

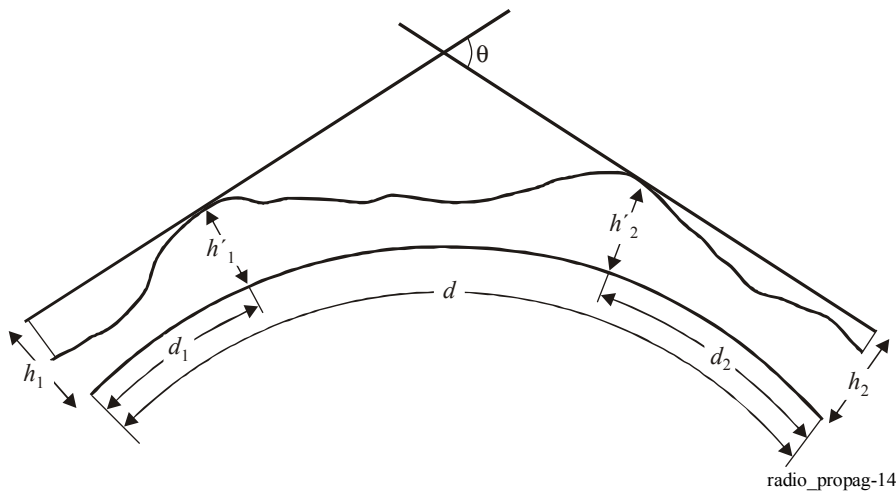
$a$ : радиус Земли 6370 км,

$k$ : коэффициент эффективного радиуса Земли для средних атмосферных условий (должно использоваться значение  $k = 4/3$ , если более точное не известно)

и высотами антенн ( $h_{1,2}$  и  $h'_{1,2}$ ) (м) и расстояниями ( $d_{1,2}$ ) (км), которые показаны на Рисунке 14.

РИСУНОК 14

Геометрия рассеивания



Для других процентов времени года, существует семейство кривых как функций эффективного расстояния и климата, представленных в [Rice и др., 1967 г.]. В этом методе принята во внимание географическая изменчивость климата Земли и определены девять радиоклиматических районов: Экваториальный; Континентальный субтропический; Морской субтропический; Пустыня; Средиземноморье; Континентальный умеренный; Морской умеренный, над сушей; Морской умеренный, над морем; Полярный. Такое разделение, конечно, немного грубое и местные географические условия могут потребовать существенных изменений. Краткое описание этих климатов приведено в Рекомендации МСЭ-R P.617.

Второй метод был основан на измерениях, проведенных в Европе и Африке, и он является полностью графическим. Набор кривых построен для следующих климатических районов: Экваториального; Морского субтропического; Пустыни; Континентального умеренного; Морского умеренного, над сушей. Эти кривые показывают потери передачи изотропных антенн на частоте 1 ГГц для числа процентов времени (1%, 10%, 50%, 90%, 99% и 99,9%) наихудшего месяца в течение года, который может применяться в проектировании радиорелейных систем [Boithias и Battesti, 1965 г.]. Для частот, отличных от 1 ГГц, вводится поправочный коэффициент (дБ), равный  $30 \log(f/1\ 000)$ , выражающий  $f$  в МГц.

В этом методе кривые предполагают, что горизонт виден от каждого конца линии на нулевом угле места. Если углы места равны, соответственно  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , в радианах, реальное расстояние должно быть заменено эквивалентным расстоянием  $d_q$  (км) представленным как:

$$d_q = d + 8,5 (\theta_1 + \theta_2) \quad (134)$$

Кроме того, к потерям должен быть добавлена следующая величина, вычисляемая как:

$$20 \log (d/d_q) . \quad (135)$$

Немного позже простой и достаточно точный метод был разработан в Китайской Народной Республике [Zhang, 1988 г.]. Его первоначальная форма пришла из [Zhang, 1977 г.], в котором рассеивающаяся часть была использована в виде:

$$\sigma = A \lambda^n \theta m e^{-\gamma h} , \quad (136)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $\theta$  – угол рассеяния,  $h$  – высота от основания объема рассеяния до поверхности Земли, и  $A$ ,  $n$ ,  $m$ , и  $\gamma$  – метеорологические параметры. Коэффициенты  $\lambda$  и  $\theta$  характеризуют механизм рассеяния, который может быть турбулентным рассеянием, когда  $n = m - 4$ , и также может быть некогерентным слоем рефракции, когда  $n$  и  $m$  имеют другие значения. Экспоненциальный коэффициент характеризует неоднородность напряженности поля на высоте. Начальная теоретическая форма потерь передачи была изменена корректировкой ее метеорологических параметров, сначала используя китайские данные распространения, а затем используя банк данных 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи. Данная процедура привела к очень простому уравнению для средних годовых потерь передачи. Кроме того, считалось, что, как характеристика годового изменения, разница между потерями передачи, не превышаемыми для 50% и 90% времени имеет вид:

$$Y(90) = a' + b' e^{-c'h} , \quad (137)$$

где  $a'$ ,  $b'$  и  $c'$  – константы, которые будут определены и  $h$  – высота от основания объема рассеяния до поверхности Земли. Константы  $a'$  и  $c'$  зависят от климата, в то время как константа  $b'$  зависит от диапазона годового изменения  $\Delta N_S$  (поверхность отражения), частоты и климата.

#### 4 Прогнозирование потерь передачи

Материалы, представленные в этом разделе в основном основаны на Рекомендации МСЭ-R P.526, частично на версии МСЭ-R P.526-3 и МСЭ-R P.526-9 для дифракции и МСЭ-R P.617 для рассеяния. Поскольку эти Рекомендации охватывают предельное число практических случаев, отсылаем читателя к списку справочных материалов в предыдущем разделе. С другой стороны, детали концепции потерь передачи, использованные здесь, могут быть найдены в Рекомендации МСЭ-R P.341.

##### Анализ профиля трассы

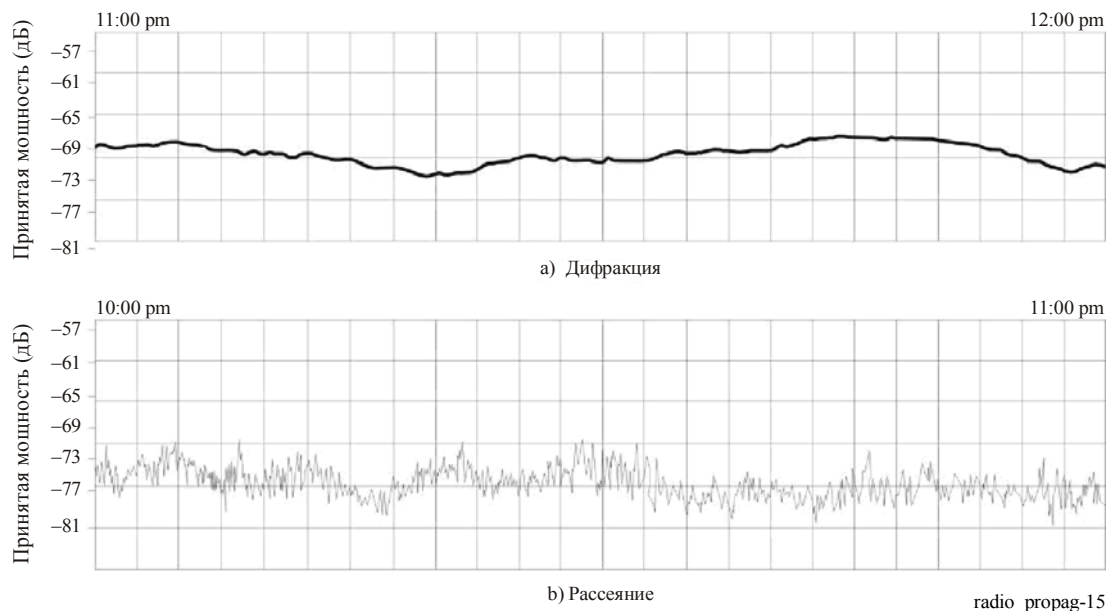
Первым шагом в данном анализе является построение профиля трассы на графике с линейным масштабом путем изменения высоты рельефа, для того чтобы учесть явление тропосферной рефракции. В случае отсутствия информации о соответствующем эквивалентном радиусе Земли, который будет использоваться, может использоваться его стандартное значение 8500 км из справочных материалов.

Как только профиль трассы построен удобнее всего, следующим шагом является проверка главного механизма распространения (дифракции или рассеяния). Как показано на Рисунке 12 даже на трассе с прямой видимостью дифракция может быть эффективной. Разнесение между областями интерференции и дифракции ( $d_1$  на Рисунке 12) соответствует точке, где просвет трассы в выражении радиуса первой зоны Френеля будет равным 0,6 (см. Рекомендацию МСЭ-R P.530).

Разнесение между областями дифракции и рассеяния ( $d_2$  на Рисунке 12) не так легко определить. Экспериментальные данные показывают, что должна быть рассмотрена промежуточная область, где действуют и механизм дифракции, и механизм рассеяния. Эта область в основном расположена от 100 до 150 км выше передающего участка антенны. В таком случае, можно оценить потери ослабления по средству обоих механизмов и использовать один самый правильный из них для данного применения (наибольшее ослабление для планирования и наименьшее ослабление для вычисления интерференции). Для того чтобы проиллюстрировать эту ситуацию, Рисунок 15 [Assis, 1986 г.] показывает два вида изменений в приемной антенне на линии с частотой 300 МГц, протяженностью 135 км, расположенной в районе Амазонки (экваториальный климат).

РИСУНОК 15

#### Пример регистрации принятой мощности в УВЧ диапазоне в экваториальном районе



В течение дня доминирующим является механизм распространения тропосферного рассеяния, и принимаемая мощность колеблется в большом диапазоне, около 10 дБ. В течение ночных часов поведение сигнала совсем другое. Под действием тропосферного наслоения, принимаемая мощность колеблется медленно, без быстрых флуктуаций, наблюдаемых в дневное время.

## 4.1 Потери из-за дифракции

Для распространения над земной поверхностью часто встречаются дифракционные трассы, и необходимо оценить потери при передаче из-за дифракции над сферической земной поверхностью или над пересеченной местностью, включая различные типы препятствий. В обоих случаях потерями из-за дифракции называют ослабление относительно свободного пространства.

### 4.1.1 Дифракция над сферической земной поверхностью

Для оценки потерь из-за дифракции в случае тропосферных трасс в Рекомендации МСЭ-R P.526 представлен цифровой метод и графический метод, и тот, и другой получены из одного и того же приближения, т. е. доминирования первого члена остаточного ряда. Цифровой метод основан, главным образом, на вкладе от Администрации США, тогда как графический метод взят из вклада, представленного Администрацией Франции. В обоих методах указанные выше приближения позволяют по отдельности оценить влияние расстояния и высоты подвеса антенны.

Следует отметить, что, в полосе ОВЧ и выше нее при горизонтальной поляризации над любым типом почвы или вертикальной поляризации над землей, влиянием электрических характеристик земной поверхности можно пренебречь. Однако это влияние должно учитываться для вертикальной поляризации над морем на частотах до 300 МГц. Для этого цифровой метод, описанный в Рекомендации МСЭ-R P.526, включает параметр  $\beta$  [Voithias, 1983 г.], который зависит от эффективной относительной диэлектрической постоянной  $\epsilon$  и эффективной проводимости  $\sigma$  Земли. То же самое применимо и к графическому решению, в котором для каждой ситуации используется своя пара номограмм.

В случае трасс прямой видимости с внутренней дифракцией на трассе рекомендуется применять линейную интерполяцию между пределом зоны дифракции (просвет 0,6 от радиуса первой зоны Френеля), где ослабление относительно свободного пространства равно нулю, и радиогоризонтом.

#### 4.1.2 Дифракция у клиновидного препятствия

Эта идеальная модель относится только к тем случаям, когда радиусом кривизны препятствия можно пренебречь, как, например, на трассе с общим горизонтом для обоих терминалов. Аппроксимирующее уравнение [Voithias, 1983 г.] для оценки этих потерь распространения из-за клиновидного препятствия относительно свободного пространства приводится в Рекомендации МСЭ-R P.526.

#### 4.1.3 Отдельное округлое препятствие

Решение, принятое в Рекомендации МСЭ-R P.526, основано на работе Dougherty и Maloney [1964 г.], а также Dougherty и Wilkerson [1967 г.]. Согласно этим авторам, потери из-за дифракции определяются выражением:

$$A = J(\nu) + T(m, n), \quad (138)$$

где  $J(\nu)$  – потери Френеля Киргоффа, при которых предполагается наличие одного острого препятствия (клиновидного), а  $T(m, n)$  – корректирующая функция, учитывающая размеры препятствия ( $m$  и  $n$ ). Параметр  $\nu$  определяется следующим образом:

$$\nu = [2]^{1/2} h/F_1, \quad (139)$$

где  $h$  – закрытость трассы, измеренную от линии, соединяющей передающую и приемную антенны, а  $F_1$  – радиус первой зоны Френеля, оцененный в месте нахождения препятствия. С другой стороны в исходных материалах вышеуказанных авторов функция  $T(m, n)$  имеет следующий вид:

$$T(m, n) = T(\rho) + Q(X), \quad (140)$$

где:

$$T(\rho) = 7,2 \rho - 2 \rho^2 + 3,6 \rho^3 - 0,8 \rho^4 \quad (141)$$

и

$$Q(X) = \begin{cases} 12,5 X & \text{для } 0 < X < 4 \\ 17 X - 6 - 20 \log X & \text{для } X \geq 4 \end{cases}, \quad (142)$$

где  $m = \rho^2$ ;  $mn = X$ ;  $\rho = (\lambda^2 R)^{1/3} / \pi^{1/6} F_1$ ;  $X = (\pi R)^{1/3} \lambda^{2/3} h / F_1^2$ , а  $R$  – радиус кривизны препятствия.

Важной проблемой в применении этого решения заключается в определении радиуса кривизны препятствия. Практичным решением, которое позволяет сделать это с допустимой точностью [Crysdale, 1958 г.; Assis, 1971 г.], состоит в том, чтобы использовать радиус кривизны в верхней точке параболы, соответствующей профилю препятствия вблизи вершины. Если имеются цифровые карты с топографической информацией земли, то эту процедуру можно легко применить.

#### 4.1.4 Двойное клиновидное препятствие

В Рекомендации МСЭ-R P.526 предлагается два метода. Самым простым является метод Эпштейна (Epstein) и Петерсона (Peterson) [1953 г.]. Однако коррекция на основе документа [Millington и др., 1962 г.] предлагает учитывать разнесение между пиками. Если один пик доминирует, то рекомендуется использовать метод Дейго [Deygout, 1966 г.]. В этом случае коррекция не является необходимой.

#### 4.1.5 Несколько отдельных препятствий

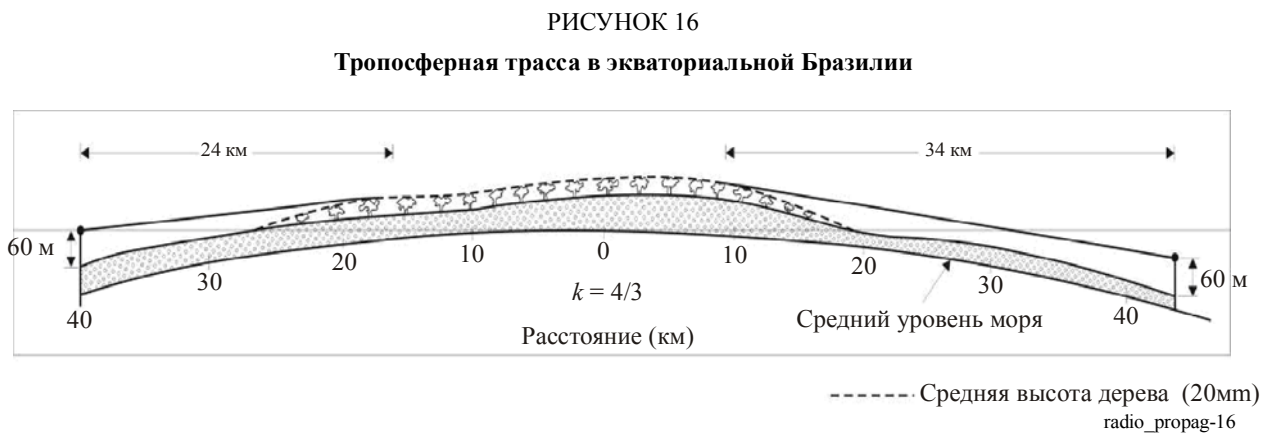
Как указано ранее, в Рекомендации МСЭ-R P.526 предложено два метода. Один основан на каскадном расположении цилиндров и других препятствий с острыми краями. Метод каскадного расположения цилиндров имеет серьезную математическую основу, и поддерживается множеством экспериментальных результатов [Sharples и Mehler, 1989 года и Eliades, 1993 года]. Метод острого ножа основан на подходе, предложенном Дейго [1966 г.], ограниченном до трех краев с эмпирической коррекцией. Можно показать, что модель Дейго совместима с геометрической теорией дифракции [Pogozelski, 1980 г.]. Однако эмпирическая коррекция не имеет физического смысла, поскольку не учитываются размеры препятствий.

Следует понимать, что модель клиновидного препятствия проще реализовать в компьютерной программе, и она может быть использована как первый подход для целей планирования. Однако если важно иметь точность, то предпочтение следует отдавать методу каскадных цилиндров.

#### 4.1.6 Примеры применений

##### 4.1.6.1 Трасса над сферической Землей

На Рисунке 16 показан профиль трассы для частоты 328 МГц протяженностью 84 км, расположенной в Амазонии между городами Кастанхал и Капанема, штат Пара, Бразилия.



Эта трасса отображена с эквивалентным радиусом Земли 8500 км. Большая часть трассы покрыта густыми лесами, где средняя высота деревьев составляет порядка 20 м. Хотя это – не точно гладкая трасса над сферической Землей, для расчета потерь из-за дифракции использовалась процедура, описанная в п. 4.2.1. Однако для гарантии целостности физической проблемы было выдержано расстояние между горизонтами (26 км), а также расстояние от каждого терминала до его горизонта (24 км и 34 км).

При таких допущениях была определена следующая эквивалентная трасса:

- протяженность трассы: 84 км;
- эквивалентная высота антенны на терминале А:  $h_A = 34$  м;
- эквивалентная высота антенны на терминале В:  $h_B = 68$  м.

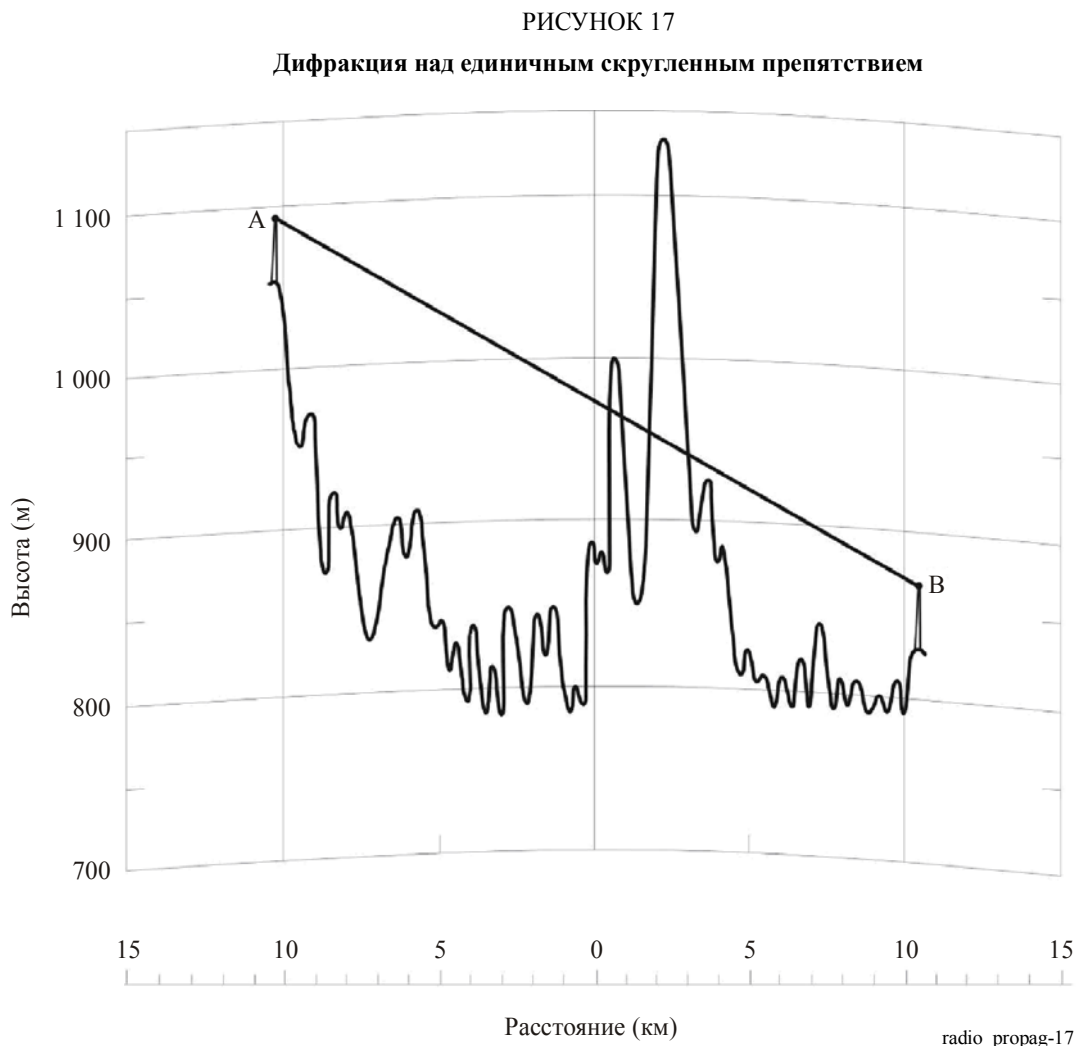
С такими данными оценка потерь из-за дифракции достаточно проста, т. е.:

- потери на дистанции:  $-36,2$  дБ (по номограмме  $36,0$  дБ);
- выигрыш по высоте на терминале А:  $-1,9$  дБ (по номограмме  $-1,5$  дБ);
- выигрыш по высоте на терминале В:  $5,4$  дБ (по номограмме  $5,0$  дБ).

При этом потери из-за дифракции относительно свободного пространства составили 32,7 дБ (по номограмме 36,5 дБ). Эти значения соответствуют измеренной величине (34,8 дБ).

#### 4.1.6.2 Дифракция на отдельном препятствии

На Рисунке 17 показан профиль дифракционной трассы для частоты 300 МГц, протяженностью 20,5 км между городами Брагаданса Паулишта и Пиракайя в штате Сан-Паоло, Бразилия. Эта трасса отображена с эквивалентным радиусом Земли 8500 км.



Основные параметры, полученные из рисунка, выше, таковы:

$$d_1 = 12,5 \text{ км}; \quad d_2 = 8,0 \text{ км}; \quad h_a = 1086 \text{ м}; \quad h_b = 865; \quad h_n = 1135 \text{ м}; \quad R = 1500 \text{ м},$$

когда  $\lambda = 1 \text{ м}$ , в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.526, параметр  $\nu$  рассчитывается из:

$$h = h_n + d_1 d_2 / (2ka) - (h_a d_2 + h_b d_1) / d = 190 \text{ м}, \quad (143)$$

$$\nu = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = 3,8. \quad (144)$$

с  $R, d_1, d_2, h$  и  $\lambda$  в самодостаточных единицах.



а) Потери Френеля-Кирхгоффа

Из Рекомендации МСЭ-R P.526:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) = 24,4 \text{ дБ.} \quad (145)$$

б) Дополнительное ослабление из-за кривизны препятствия

Применение Рекомендации МСЭ-R P.526 приводит к результату:

$$m = R \left[ \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] \Bigg/ \left[ \frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} = 0,018 \quad (146)$$

$$n = h \left[ \frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} \Bigg/ R = 35,5 \quad (147)$$

с  $R$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $h$  и  $\lambda$  в самодостаточных единицах.

$$T(m, n) = 7,2 m^{1/2} - (2 - 12,5 n)m + 3,6 m^{3/2} - 0,8 m^2 = 9,1 \text{ дБ} \quad (148)$$

с) Суммарные потери из-за дифракции

$$A = J(v) + T(m, n) = 33,5 \text{ дБ.} \quad (149)$$

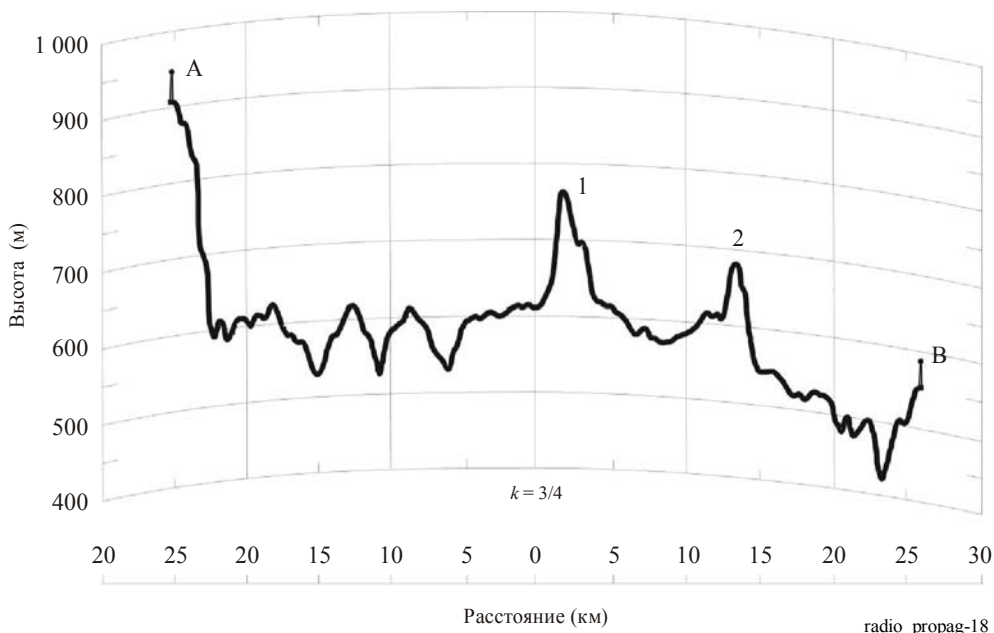
Измеренное значение потерь из-за дифракции относительно свободного пространства составляло 34,9 дБ.

4.1.6.3 Дифракция на нескольких отдельных препятствиях

На Рисунке 18 показан профиль дифракционной трассы для частоты 312,27 МГц ( $\lambda = 0,94$  м) протяженностью 50,6 км между двумя радиорелейными станциями вблизи города Касу штата Гойяс, Бразилия.

РИСУНОК 18

Дифракция над двумя скругленными препятствиями



Эта трасса отображена с эквивалентным радиусом Земли 8500 км. Основные параметры, полученные из рисунка, выше, таковы:

$$a = 26,6 \text{ км}; \quad b = 11,8 \text{ км}; \quad c = 12,2 \text{ км}; \quad h_a = 943 \text{ м}; \quad h_b = 591 \text{ м}; \quad h_{n1} = 762 \text{ м}; \quad h_{n2} = 684 \text{ м}$$

Радиус кривизны препятствий 1 и 2 равнялся, соответственно, 1500 м и 1000 м.

Для метода каскадных цилиндров суммарные потери из-за дифракции в дБ относительно потерь в свободном пространстве приведены в Рекомендации МСЭ-R P.526:

$$L_d = L'_1 + L'_2 - 20 \log C_2, \quad (150)$$

где:

$L'_1$ : потери из-за дифракции на первом цилиндре, рассчитанные по методу, приведенному в Рекомендации МСЭ-R P.526,

$L'_2$ : то же самое для второго цилиндра,

$C_2$ : коэффициент коррекции для учета потерь рассеяния из-за дифракция на последовательно соединенных цилиндрах.

Коэффициент коррекции  $C_2$  вычисляется по формуле:

$$C_2 = (P_a / P_b)^{0,5} \quad (151)$$

$$P_a = abc(a + b + c), \quad (152)$$

$$P_b = ac(a + b)(b + c). \quad (153)$$

Параметры  $h'_{1,2}$  и  $v'_{1,2}$  для препятствий 1 и 2, рассчитанные тем же способом, что и в предыдущем примере, равны  $h'_1 = 17 \text{ м}$ ,  $v'_1 = 0,27$ ,  $h'_2 = 14,5 \text{ м}$ ,  $v'_2 = 0,27$ .

Тогда:

$$J(v_1) = J(v_2) = 8,4 \quad \text{дБ} \quad (154)$$

Параметры  $m_1$ ,  $n_1$  и  $m_2$ ,  $n_2$  рассчитываются, как и в предыдущем примере с учетом того, что  $m_1 = 0,011$ ,  $n_1 = 3,32$ ,  $m_2 = 0,011$  и  $n_2 = 3,24$ .

Дополнительные потери из-за кривизны препятствий составят:

$$T_1(m_1, n_1) = T_2(m_2, n_2) \cong 1,2 \quad \text{дБ}. \quad (155)$$

Коррекционный член, учитывающий расстояние между препятствиями рассчитывается по формуле:

$$C_2(\text{дБ}) = 10 \log (P_a + P_b) = -1,9 \quad \text{дБ}. \quad (156)$$

И превышение потерь становится равным:

$$L = J(v_1) + T_1(m_1, n_1) + J(v_2) + T_2(m_2, n_2) - C_2 = 21,1 \quad \text{дБ}. \quad (157)$$

Измеренное превышение потерь в этой линии составило 23 дБ.

Иначе, может использоваться также метод каскадных клиновидных препятствий. Первым шагом в применении конструкции Дейго является определение главного края, т. е., пика с наивысшим значением  $v$ .

Для препятствия 1,  $d_1 = d_a = 26,6 \text{ км}$ ;  $d_2 = (d_b + d_c) = 24 \text{ км}$ ;  $h_n = 762 \text{ м}$ ;  $R = 1500 \text{ м}$ , что дает:

$$h_1 = h_n + d_1 d_2 / (2ka) - (h_a d_2 + h_b d_1) / d = 41,6 \text{ м} \quad (158)$$

$$v_1 = h_1 \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = 0,54 \quad (159)$$

Для препятствия 2,  $d_1 = (d_a + d_b) = 28,4$  км;  $d_2 = d_c = 12,2$  км;  $h_n = 684$  м;  $R = 1\,000$  м, что дает:

$$h_2 = h_n + d_1 d_2 / (2ka) - (h_a d_2 + h_b d_1) / d = 35,7 \text{ м} \quad (160)$$

$$v_2 = h_2 \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = 0,54 \quad (161)$$

Поскольку величина  $v$  одинакова для обоих препятствий, главным можно назначить любое из них. В этом примере главным будет препятствие 1.

Потери, связанные с главным препятствием, рассчитываются по формуле:

$$J(v_1) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v_1 - 0,1)^2 + 1} + v_1 - 0,1 \right) = 10,6 \text{ дБ} \quad (162)$$

Потери, связанные с вторичным препятствием, представляют собой функцию с новыми параметрами  $h'_2$  и  $v'_2$ , которая дает  $d_1 = d_b = 11,8$  км;  $d_2 = d_c = 12,2$  км;  $h_a = 762$  м;  $h_b = 591$  м;  $h_n = 684$  м;  $R = 1500$  м:

$$h'_2 = 14,5 \text{ м} \quad (163)$$

$$v'_2 = 0,27 \quad (164)$$

$$J(v'_2) = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v'_2 - 0,1)^2 + 1} + v'_2 - 0,1 \right) = 8,4 \text{ дБ} \quad (165)$$

Эмпирическая коррекция  $C$  описана в Рекомендации МСЭ-R P.526:

$$C = 10,0 + 0,04 (d_a + d_b + d_c) = 12 \text{ дБ} \quad (166)$$

Параметр  $T$  рассчитываются по формуле:

$$T = 1,0 - \exp[-J(v_1)/6,0] = 0,83 \quad (167)$$

И, наконец, потери из-за дифракции описаны в Рекомендации МСЭ-R P.526:

$$L = J(v_1) + T [J(v_2) + C] = 27,5 \text{ дБ} \quad (168)$$

## 4.2 Потери передачи из-за тропосферного рассеяния

Метод, приведенный в Рекомендации МСЭ-R P.617 для оценки среднегодовых потерь передачи  $L(q)$ , которые не превышаются в течение более 50% времени, главным образом, основан на методе, разработанном в документе [Zhang, 1988 года], который сам частично основан на более ранних методах [Rice и др., 1967 г. и Voithias и Battesti, 1965 г.], и основы которого описаны в п. 3.2. Общее выражение для среднегодовых потерь передачи, которые не превышаются в течение  $q\%$  времени, рассчитываются по формуле:

$$L(q) = M + 30 \log f + 30 \log \theta + 10 \log d + 30 \log \theta + L_N + L_c - G_t - G_r - Y(q), \quad (169)$$

где, кроме ранее определенных параметров ( $f$ ,  $d$ ,  $L_c$ ,  $\theta$ ,  $G_t$  и  $G_r$ ),  $M$  – метеорологический коэффициент,  $L_N$  включает зависимость потерь передачи от высоты общего объема, а  $Y(q)$  – это разница между потерями передачи, которые не превышаются в течение 50% времени, и потерями передачи, которые не превышаются в течение  $q\%$  времени.

Для выяснения связи между пошаговой процедурой, описанный в п. 3 вышеуказанной Рекомендации, и тремя эмпирическими методами, рассмотренными в п. 3.2 данного Справочника, следует отметить, что:

- а) параметры структуры атмосферы  $\gamma$ , полученные на основе экспериментальных данных и величинах метеорологического коэффициента  $M$ , приведены в Рекомендации МСЭ-R P.617 для каждой климатической зоны, указанной в п. 3.2;

- b) приведенная в Рекомендации МСЭ-R P.617 высота общего объема над земной поверхностью – это приблизительное выражение для случая, когда участок трассы за пределами горизонтов двух терминалов находится над гладкой поверхностью земли. На практике эту высоту можно точно определить, исходя из геометрии трассы;
- c) коэффициент преобразования  $Y(q)$  для  $q\%$  времени был получен, как отмечено выше, с применением метода регрессии, используя банк данных 3-й Исследовательской комиссии по радиосвязи для климатических зон 2, 6, 7a и 7b, а также на основе графиков для  $Y(90)$  из публикации [Rice *и др.*, 1967 г.] для климатических зон 1, 3 и 4 (для этих трех климатических зон нет доступных данных для применения метода регрессии).

Дополнительно из среднегодового распределения при помощи коэффициента преобразования на основании графиков, приведенных в публикации Voithias и Battesti [1965 г.], определяется распределение средних потерь передачи для наихудшего месяца для более 50% времени.

И наконец, в Рекомендации МСЭ-R P.617 рассматривается также и разнесенный прием. Уравнения, приведенные для горизонтального и вертикального пространственного разнесения, взяты из [Fehlhaber и Grosskopf, 1967 г.]. С другой стороны, в случае частотного разнесения рекомендуемое разнесение определено в [Fehlhaber, 1967 г.]. Рассматривается также и угловое разнесение. Простая система такого типа, использованная в приемнике. Может обеспечить качество, сравнимое по величине с тем, что получается при пространственном разнесении, но существенно более экономично обеспеченное, чем в [Surenian, 1965 г.]. Следовательно, считается, что качество углового разнесения сравнимо с качеством частотного разнесения, хотя при этом немного увеличиваются потери при передаче.

#### 4.2.1 Коэффициент усиления антенны на трассе

В тропосферной радиорелейной системе передача радиоэнергии осуществляется за счет суммарных переотражений от всех атмосферных неоднородностей, освещаемых передающей антенной. Следовательно, волна, поступающая на приемную станцию, не является плоской волной, так что видимый коэффициент усиления приемной антенны меньше, чем ее коэффициент усиления в свободном пространстве, который определен для плоской волны. По той же причине ширина луча антенны кажется больше, чем при плоской волне. Это уменьшение коэффициента усиления называется "переходными ослаблениями антенна-среда передачи" или "потерей усиления".

Теоретический анализ этого явления [Rice *и др.*, 1967 г.] показывает, что потеря усиления будет зависеть от усиления антенны и от расстояния. Вопреки этому теоретическому предсказанию, опыт показывает, что потеря усиления практически не зависит от расстояния между 150 км и 500 км [Voithias и Battesti, 1964 г.], как минимум, в умеренных климатических зонах.

На основе экспериментальных данных было получено следующее эмпирическое уравнение [Voithias, 1983 г.] для расчета суммарного эффективного усиления  $G_e$  в линии тропосферного рассеяния как функции от суммы коэффициентов усиления обеих антенн в свободном пространстве:

$$G_e = (G_t + G_r) \exp\left(-\frac{a^4}{1 + a^4}\right), \quad (170)$$

где:

$$a = \frac{G_t + G_r}{148}.$$

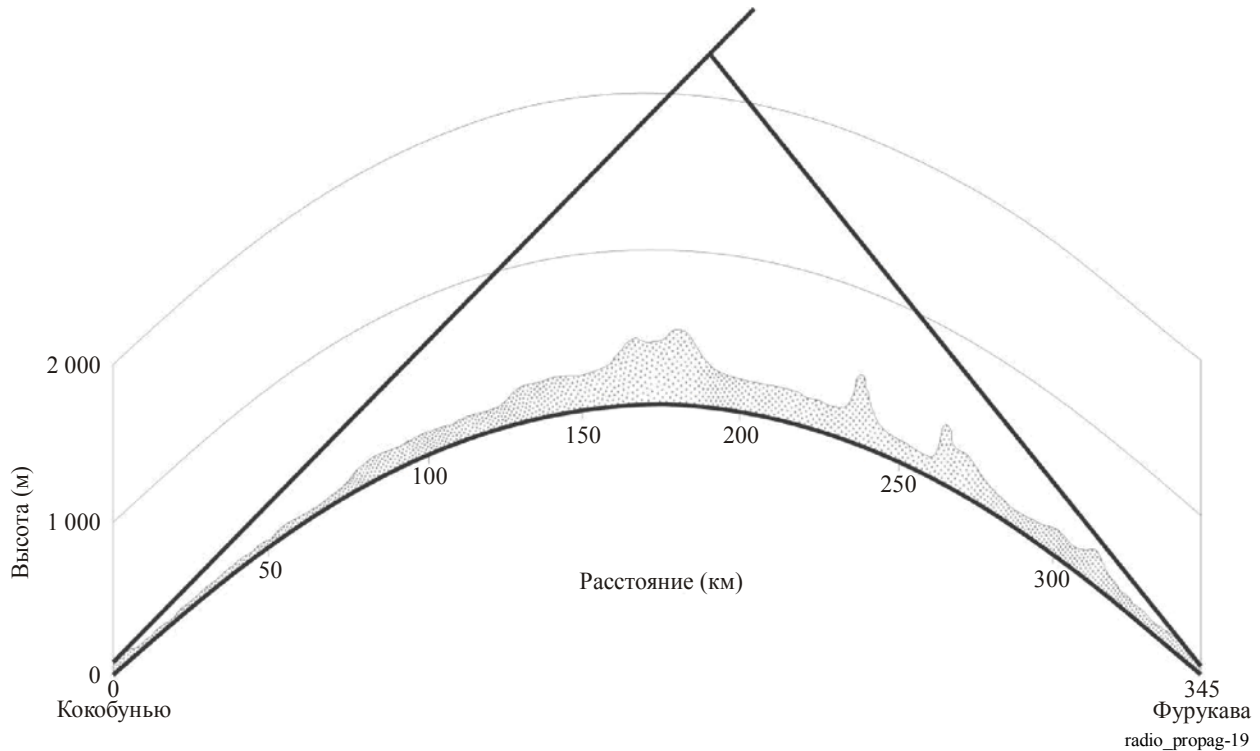
Эта формула справедлива, если  $G_t + G_r < 120$  дБ и когда коэффициенты усиления антенн близки.

Численный анализ показывает, что разница между формулой, приведенной в [Voithias, 1983 г.] и формулой из уравнения (10) в Рекомендации МСЭ-R P.617 дают среднее значение  $-0,24$  дБ и среднеквадратическое значение  $0,61$  дБ для  $G_e$  от 50 до 100 дБ.

### 4.2.2 Пример применения

На Рисунке 19 показан профиль линии тропосферного рассеяния между городами Кокубунью и Фурукава в Японии.

РИСУНОК 19  
Профиль линии тропосферного рассеяния Кокубунью-Фурукава



Широта и долгота точек:

Кокубунью:  $35^{\circ} 42' 24''$  с. ш.;  $139^{\circ} 29' 18''$  в. д.

Фурукава:  $38^{\circ} 34' 22''$  с. ш.;  $140^{\circ} 57' 51''$  в. д.

Основные параметры таковы:  $f = 600$  МГц;  $d = 345$  км;  $h_1 = 103$  м;  $h_2 = 25$  м;  $h'_1 = 104$  м;  $h'_2 = 80$  м;  $d_1 = 4$  км;  $d_2 = 8$  км;  $G_t + G_r = 56$  дБ.

Для расчета потерь передачи используется пошаговая процедура из Рекомендации МСЭ-R P.617.

*Шаг 1:* Определить соответствующую климатическую зону для линии. Это сухопутная линия между точками с широтой  $35^{\circ}$  с. ш. и  $39^{\circ}$  с. ш. Окружающая земная поверхность – неровная. Сообщалось, что среднемесячная усредненная отражающая способность поверхности изменяется в течение года примерно в диапазоне 60 единиц. В соответствии с описаниями климатических зон в Рекомендации МСЭ-R P.617, соответствующей климатической зоной для этой линии является тип 6, т. е. умеренный континентальный климат.

*Шаг 2:* Определить метеорологические параметры и параметры структуры атмосферы  $M$  и  $\gamma$ . В соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.617, эти два параметра для климатической зоны 6 равны:

$$M = 29,73 \text{ дБ}; \quad \gamma = 0,27 \text{ км}^{-1}. \quad (171)$$

*Шаг 3:* Вычислить угол рассеяния  $\theta$ . Среднегодовое снижение преломляющей способности на уровне высотой 1 км от поверхности для района, окружающего линию, можно оценить, используя Рекомендацию МСЭ-R P.453, и получить:

$$\Delta N \approx 40 N - \text{единиц} \quad (172)$$

Следовательно, коэффициент эффективного радиуса Земли для условий средней преломляющей способности, равен:

$$k = 1/(1 - a \Delta N \times 10^{-6}) \cong 4/3, \quad (173)$$

где  $a$  – реальный радиус Земли, т. е. 6370 км. Углы горизонта передачи и приема, соответственно составят:

$$\theta_t = (h'_1 - h_1) / d_1 - d_1 \cdot h_1 / (2ka) \cong 0,2 \text{ мрад}, \quad (174)$$

$$\theta_r = (h'_2 - h_2) / d_2 - d_2 \cdot h_2 / (2ka) \cong 6,7 \text{ мрад}, \quad (175)$$

В соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.617:

$$\theta = d \times 10^3 / (ka) + \theta_t + \theta_r = 47,7 \text{ мрад}. \quad (176)$$

*Шаг 4:* Оценить влияние  $L_N$  на высоту общего объема. Из Рекомендации МСЭ-R P.617 при  $\gamma(\text{км}^{-1}) = 0,27$  (климатическая зона б):

$$H = 10^{-3} \theta d / 4 = 4,1 \text{ км}, \quad (177)$$

$$h = 10^{-6} \theta^2 ka / 8 = 2,4 \text{ км}, \quad (178)$$

$$L_N = 20 \log(5 + \gamma H) + 4,34 \gamma h = 18,56 \text{ дБ}. \quad (179)$$

*Шаг 5:* Оценить коэффициент преобразования  $Y(q)$  для процента времени не превышения  $q$ .  $Y(q)$  можно оценить по уравнению, приведенному в Рекомендации МСЭ-R P.617:

$$Y(90) = -2,2 - (8,1 - 2,3 \times 10^{-4} f) \exp(-0,137 h) = -7,9 \text{ дБ}. \quad (180)$$

и, в соответствии с этой же Рекомендацией:

$$Y(q) = C(q) \cdot Y(90) \text{ дБ}, \quad (181)$$

где  $C(50) = 0$ ,  $C(99) = 1,82$  и  $C(99,9) = 2,41$ . Отсюда:

$$Y(50) = 0 \text{ дБ}; \quad Y(99) = -14,41 \text{ дБ}; \quad Y(99,9) = -19,1 \text{ дБ}. \quad (182)$$

*Шаг 6:* Оценить потери на переходе апертура-среда передачи  $L_c$ . Из Рекомендации МСЭ-R P.617:

$$L_c = 0,07 \cdot \exp[0,055(G_t + G_r)] = 1,52 \text{ дБ}. \quad (183)$$

*Шаг 7:* Оценить среднегодовые потери передачи  $L(q)$ , не превышаемые в течение  $q\%$  времени. В соответствии с уравнением (169), при  $M = 29,73$  (климатическая зона б):

$$L(50) = 152,9 \text{ дБ}; \quad L(90) = 160,8 \text{ дБ}, \quad (184)$$

$$L(99) = 167,3 \text{ дБ}; \quad L(99,9) = 172 \text{ дБ}. \quad (185)$$

Измеренные результаты среднегодовых потерь передачи равны:

$$L_{meas}(50) = 151,8 \text{ дБ}; \quad L_{meas}(90) = 162,8 \text{ дБ}, \quad (186)$$

$$L_{meas}(99) = 169,8 \text{ дБ}. \quad (187)$$

И ошибки предсказания составили 0,9 дБ, -2 дБ и -2,5 дБ для 50%, 90% и 99% времени, соответственно.

В Рекомендации МСЭ-R P.617 также описывается пошаговый метод преобразования среднегодового распределения в распределение для наихудшего месяца.

**Шаг 8:** Определить разность  $\Delta L(q)$  между среднегодовыми потерями передачи и средними потерями передачи для наихудшего месяца для  $q\%$  времени. Эквивалентное расстояние можно получить из уравнения:

$$d_e = \theta ka \times 10^{-3} = 400 \text{ км.} \quad (188)$$

В Рекомендации МСЭ-R P.617 указаны следующие значения для  $\Delta L(q)$  в климатической зоне 6 и на эквивалентном расстоянии 400 км:

$$\Delta L(50) = 5,9 \text{ дБ}; \quad \Delta L(90) = 5,1 \text{ дБ} , \quad (189)$$

$$\Delta L(99) = 4,4 \text{ дБ}; \quad \Delta L(99,9) = 4,0 \text{ дБ} \quad (190)$$

**Шаг 9:** Оценить средние потери передачи для наихудшего месяца  $L_w(q)$  для  $q\%$  времени, добавив разницу  $\Delta L(q)$  к величине средних потерь передачи  $L(q)$ :

$$L_w(50) = 158,6 \text{ дБ}; \quad L_w(90) = 165,9 \text{ дБ} , \quad (191)$$

$$L_w(99) = 171,5 \text{ дБ}; \quad L_w(99,9) = 176 \text{ дБ} . \quad (192)$$

Для наихудшего месяца нет доступных данных.

### 4.2.3 Результаты испытаний

Были проведены испытания различных методов [Zhang, 1988 г.; Rice и др., 1967 г. и Voithias и Battesti, 1965 г.]. В Таблице 6 показаны результаты испытаний где, для простоты, вышеуказанные методы обозначены как I, II и III, соответственно.

### 4.2.4 Комбинированные потери их изменчивость

#### 4.2.4.1 Влияние частоты

Общепризнано, что долгосрочные усредненные потери передачи между изотропными антеннами, основные потери передачи, возрастают в третьей степени роста частоты вплоть до частот 3 ГГц, и линейно с ростом ослабления относительно свободного пространства. При периоде измерений менее часа, было обнаружено, что зависимость от частоты ослабления относительно свободного пространства меняется от  $f^2$  до  $f^{1/3}$  [Eklund и Wickerts, 1968 г.]. Дополнительные измерения, выполненные во Франции на частотах 460 и 2220 МГц на двух расстояниях 325 км и 165 км, показали, что закон зависимости от частоты примерно составлял  $f^2$  в течение 1% времени и  $f$  в течение 99% времени на длинной линии, и  $f^{1.5}$  в течение 1% времени и  $f^{0.5}$  в течение 99% времени на короткой линии. В летнее время эта зависимость была немного выше, чем зимой, особенно для короткой линии [Voithias и Battesti, 1983 г.].

#### 4.2.4.2 Долгосрочные и кратковременные изменения потерь передачи

Наблюдается и медленные, и быстрые изменения напряженности поля. Медленные замирания из-за общего изменения условий дифракции в атмосфере, и быстрые замирания из-за перемещения мелких неоднородностей. Медленные изменения хорошо описываются распределением среднечасовых потерь передачи, которое приблизительно логнормально со стандартными отклонениями между 4 дБ и 8 дБ, в зависимости от климата.

Быстрые замирания являются результатом наложения множества переменных, неоднородных компонентов, амплитуда которых имеет Рэлеевское распределение. Найдено, что это почти соответствует действительности, когда распределение анализируется для периодов не более пяти минут. Если на принимаемый сигнал влияют сигналы другого типа, то это распределение меняется. Отмечались внезапные быстрые и глубокие замирания при прохождении через линию фронтального возмущения. Быстрые замирания могут быть вызваны отражениями от самолета.

Быстрые замирания происходят с частотой несколько замираний в минуту в диапазоне ОВЧ и с частотой несколько герц на УВЧ. Частоты быстрых замираний исследовалась как функция автокорреляции во времени, которая дает среднюю частоту замираний для коротких периодов времени, в течение которых сигнал является стационарным. Найдено, что усредненные значения средней частоты замираний растут почти пропорционально длине трассы и несущей частоте, и немного уменьшается с увеличением диаметра антенны. Скорость замираний особенно важна при передаче цифрового сигнала. Влияние быстрых замираний может быть уменьшено за счет разнесенного приема.

Деление замираний на две составляющих (медленные и быстрые) не является обязательным и предназначено только для упрощения математического анализа этого явления. Быстрые флуктуации можно добавить к медленным изменениям уровня принимаемого сигнала. Таким образом, может быть выведен результирующий закон для принимаемого сигнала с учетом того, что среднее значение Рэлеевской переменной само по себе случайно и подчиняется логнормальному закону. Для практических применений имеется графический метод объединения распределений для быстрых и медленных замираний [Panther, 1972 г.].

ТАБЛИЦА 6

## Ошибки предсказания для трасс тропосферного рассеяния

Процент времени

Номер трассы	50%			90%			99,9%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
908	2,4	0,1	6,9	2,1	-2,4	5,3			
1 440	-5,5	-10,5	-5,7	-6,9	-11,1	-9,0	-9,0	-12,7	-12,7
1 441	-0,9	-6,0	-1,1	-1,1	-4,9	-2,4	-0,8	-3,8	-3,0
2 064	1,7	-3,2	1,9	3,5	0,7	2,4	4,7	3,6	2,6
2 272	-4,4	-6,3	1,5	-5,6	-10,2	-1,5	-5,3	-12,2	-2,8
2 273	5,0	3,3	10,8	5,5	1,2	9,8	5,5	-1,0	8,6
2 304	0,7	0,4	11,1	-2,3	-5,2	6,6	-2,7	-7,7	4,9
2 305	0,6	-3,8	3,7	-0,1	-5,5	1,2	0,6	-5,8	0,3
2 306	-4,9	-5,1	5,5	-3,1	-5,9	6,0	-0,8	-5,6	7,3
2 307	0,9	-3,3	4,1	3,9	-1,3	5,5	7,3	1,2	7,6
4 901	2,9	-0,2	6,1	3,3	2,7	8,2	6,3	7,7	12,6
5 006	3,5	-1,2	5,0	7,1	3,5	7,2	4,1	1,4	3,0
5 009	-2,0	-6,0	3,9	-2,3	-4,8	2,5	-6,9	-8,4	-3,2
9 009	0,9	-0,9	14,9	-0,7	-2,7	12,4	-1,4	-3,6	10,8
9 018	2,5	-1,6	2,5	1,1	0,1	1,1	0,3	1,9	0,3
9 019	0,7	-1,2	5,6	1,5	0,8	5,4			
9 034	3,7	1,8	10,8	1,8	-1,4	7,6	1,5	-2,9	6,1
9 041	0,0	-2,6	6,4	7,4	5,9	10,0	10,5	10,0	10,0
9 042	0,0	-1,1	-0,5	-4,1	-4,6	-4,7	-7,9	-7,9	-8,6
9 043	0,0	0,7	4,6	6,9	7,6	-9,4			
9 045	-0,4	-2,8	4,0	-3,2	-7,7	-0,7	-2,7	-8,9	-1,7
9 046	0,1	-2,0	4,5	0,6	-3,2	3,9	2,5	-2,6	4,8
A	-3,7	-9,1	-2,7						
B	-0,6	-4,3	1,4						
C	-3,6	-7,6	-0,5						
Средние ошибки	0,0	-2,9	4,2	0,7	-2,2	3,9	0,3	-3,0	2,5
Средне- квадратичес- кие ошибки	2,7	4,4	6,2	4,0	5,2	6,5	5,2	6,8	7,0

## 4.2.4.3 Сезонные и внутрисуточные изменения

В большинстве климатических зон потери передачи значительно изменяются в зависимости от времени года. Что касается внутрисуточных изменений, то максимальные потери передачи наблюдаются поздним вечером и минимальные – утром.



В умеренных климатических зонах среднемесячные потери, как правило, зимой выше, чем летом. Диапазон потерь составляет от 10 до 15 дБ на сухопутных трассах длиной 150–200 км, но снижаются с ростом расстояния. Внутрисуточные изменения больше всего заметны летом, и лежат в диапазоне от 5 до 10 дБ на сухопутных трассах длиной от 100 до 200 км. На морских трассах появление суперрефракции и поднятых уровней более вероятно, поэтому на них больше и диапазон изменений. Это соображение может относиться также к низким, ровным прибрежным регионам в морских зонах.

В сухих, жарких пустынных климатических зонах ослабление достигает максимума летом. Годовое изменение среднемесячных значений может лежать в диапазоне от 15 до 20 дБ для линий длиной от 200 до 300 км, но оно также уменьшается с ростом расстояния. В этих климатических зонах наблюдаются изменения среднечасовых значений более 20 дБ.

В экваториальных климатических зонах среднегодовые и внутрисуточные изменения намного меньше, наибольшие значения потерь передачи отмечаются в сезон дождей.

В муссонных климатических зонах, где проводились испытания (Сенегал и Барбадос), в году имеется два высоких уровня, один во время сухого сезона, и другой во время сезона дождей. Следует отметить, что в этих климатических зонах максимальные значения  $N_S$  (преломляющей способности вблизи земной поверхности) наблюдаются во время сезона дождей.

## 5 Искажения, вносимые во время распространения

Искажения, создаваемые задержками многолучевости, создают интермодуляционный шум в аналоговых линиях и межсимвольные искажения в цифровых линиях. Задержка многолучевости  $T_m$  – это мера ширины принимаемой волны во временной области, когда по каналу передается сигнал в виде одиночного импульса. Ее обратное значение называется когерентной шириной полосы  $B_c$ , которая с практической точки зрения определяет доступную для передачи ширину полосы [Hall, 1979 г.; Voithias, 1983 г.]. Значительного влияния нет, если полоса передаваемого сигнала  $B$  находится внутри  $B_c$  или если длительность импульса передаваемого сигнала намного больше, чем  $T_m$ . Однако когда полоса сигнала постоянно расширяется или скорость передачи битов цифрового сигнала постоянно повышается, принимаемый сигнал становится все более и более искаженным, так что в аналоговой системе проявляется шум интермодуляции. А в цифровой повышается коэффициент ошибок из-за межсимвольных искажений.

Задержка многолучевости при тропосферном распространении, как правило, лежит в диапазоне от 0,1 до 1,0 мкс, в зависимости от геометрии трассы и ширины луча антенны. Этот параметр можно рассчитать с использованием теоретического подхода [Bello, 1969 г.]. Однако помимо математической сложности этого подхода, его совпадение с данными экспериментов только частично [Roda, 1988]. Грубую оценку значения  $T_m$  можно получить, учитывая сдвиги фазы относительно размера общего объема лучей антенны, т. е. разницы трасс  $\Delta d$ , определяемой из уравнения:

$$\Delta d(m) = (\Omega^2 + \Omega\theta) \frac{d \times 10^3}{2}, \quad (193)$$

где  $\Omega$  – ширина луча антенны по уровню 3 дБ, а  $\theta$  и  $d$  показаны на Рисунке 14, углы измеряются в град, а расстояние в км. Следовательно,  $T_m$  (мкс) можно определить следующим образом:

$$T_m(\text{мкс}) = \Delta d / (3 \times 10^2). \quad (194)$$

Что касается аналоговых линий, повышение интермодуляционного шума является достаточно сложной проблемой, которая полностью не решена. Существует несколько методов аппроксимаций [Medhurst, 1959 г.; Beach и Trecker, 1963 г. и Sunde, 1964 г.]. Экспериментальные исследования, выполненные во Франции [Battesti и Voithias, 1971 г.], показали, что:

- повышение усиления антенны расширяет доступную для передачи ширину полосы до такой степени, что потери усиления также повышаются, т. е. для значений усиления, превышающих примерно 30 дБ;
- при всех остальных одинаковых параметрах, доступная для передачи ширина полосы зависит от структуры атмосферы и, следовательно, от рассматриваемой климатической зоны;
- пригодная для использования ширина полосы сужается с увеличением расстояния, но закон этого уменьшения для разных климатических зон разный;

- пригодная для использования ширина полосы сужается при положительных углах выхода волны и расширяется, когда эти углы отрицательные.

В цифровых линиях для скоростей передачи до 2 Мбит/с многолучевые искажения, как правило, не представляют проблемы. Однако для более высоких скоростей наблюдается повышение ошибок по битам как функции отношения  $T_m/T$ , где  $T$  – длительность передаваемых символов. Рост коэффициента ошибок по битам (КОБ) незначителен для значений  $T_m/T$ , не превышающих 0,2 ~ 0,3, и быстро растет, когда этот предел превышен. Наиболее эффективной контрмерой против многолучевых искажений является комбинирование разнесенного приема и адаптивной компенсации. Эта проблема также может быть уменьшена, если угол рассеяния и ширина луча антенны поддерживаются максимально возможно маленькими, что минимизирует наибольшую разницу между трассами в общем объеме.

## 6 Методы разнесения

Термин разнесение обозначает одновременный прием двух и более сигналов, переносящих одну и ту же информацию. Разнесенный прием обязателен в радиоприемах тропосферного рассеяния для преодоления влияния изменчивости принимаемого сигнала. Для того чтобы улучшить прием, разнесенные сигналы должны быть как можно менее коррелированы. Типичными конфигурациями разнесения являются: пространственное разнесение; частотное разнесение; угловое разнесение; разнесение по поляризации и разнесение по времени.

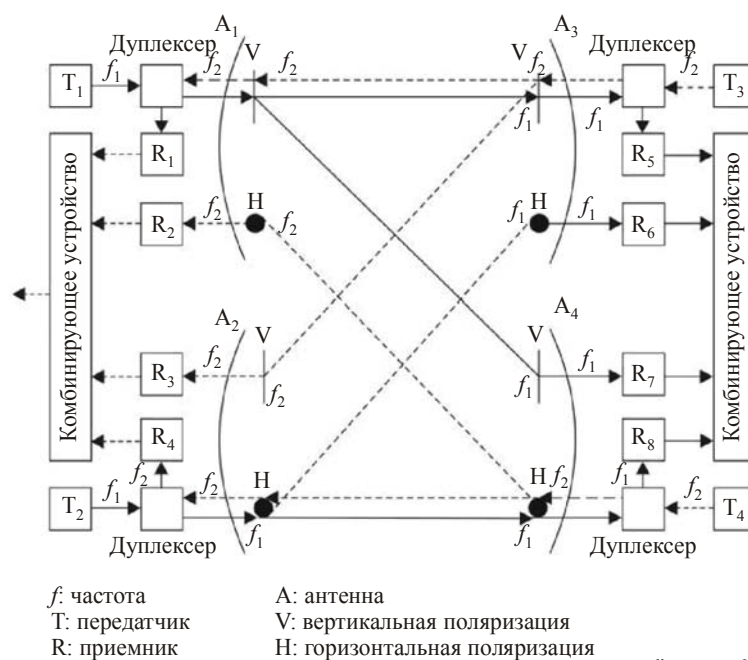
### 6.1 Пространственное разнесение

Это наиболее часто используемая конфигурация. Современные системы обычно используют четырехкратное разнесение – пространственное разнесение и разнесение по поляризации, применяя на каждом терминале две антенны с разной поляризацией для разделения двух сигналов, принимаемых каждой приемной антенной, это видно на Рисунке 20.

Структура системы четырехкратного разнесения достаточно сложна, потому что трассы радиосигнала только частично независимы, и для достижения приемлемой декорреляции необходимо тщательно выбирать расстояние между антеннами [Larsen, 1980 г.]. Иногда используется двойное пространственное разнесение. Экономия затрат при использовании терминала с двойным разнесением относительно терминала с четырехкратным разнесением достигается счет снижения надежности, поскольку последняя при выходе одного передатчика из строя будет продолжать работать с пониженным качеством [Roda, 1988 г.].

РИСУНОК 20

Конфигурация четырехзначного разнесения



Влияние пространственного разнесения изучалось в работе Fehlhaber и Grosskopf [1967 г.]. Адекватный разнос  $\Delta h$  двух приемных антенн в системе с пространственным разнесением зависит от цены деления шкалы, определяемого функцией пространственной корреляции, и от диаметра приемной антенны. Из-за статистического характера цены деления шкалы, следует использовать величину, превышаемую в течение 1% времени. В Рекомендации МСЭ-R P.617 приведены эмпирические формулы для  $\Delta h$ , как для горизонтального, так и для вертикального разнесения.

## 6.2 Частотное разнесение

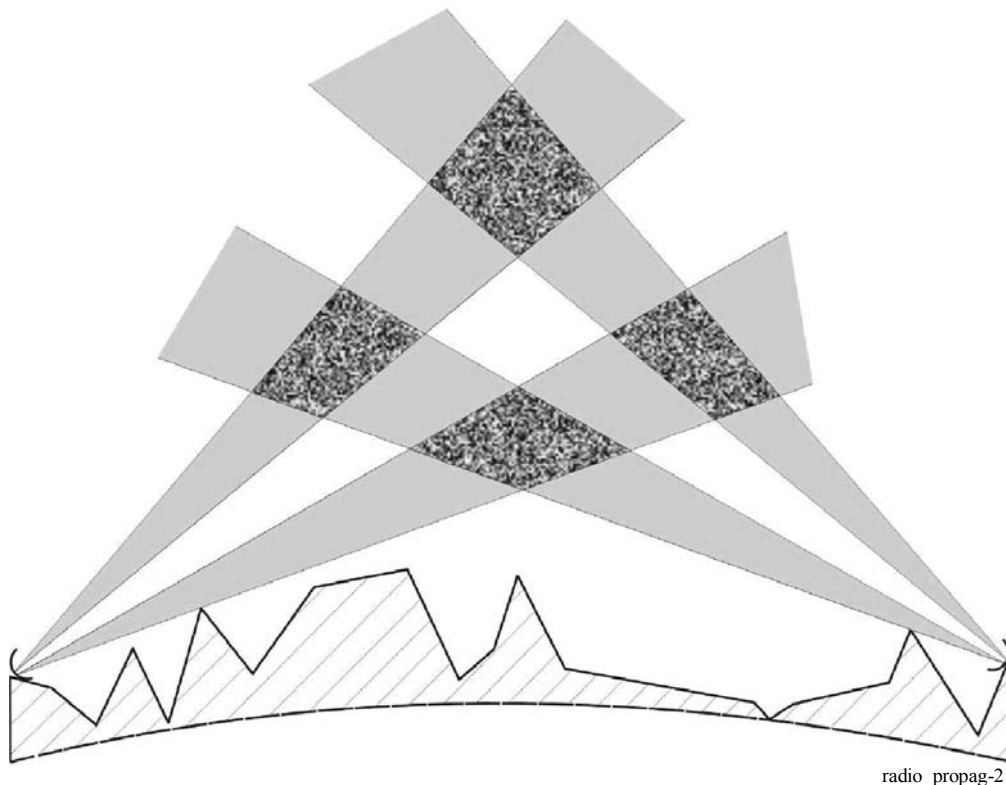
Эта конфигурация, как правило, не рекомендуется к использованию из-за перегруженности радиочастотного спектра. Было изучено изменение коэффициента частотной корреляции с изменением длины трассы [Fehlhaber, 1967 г.]. Тот же автор исследовал также приемлемое частотное разнесение  $\Delta f$ . В результате этих исследований получена приведенная в Рекомендации МСЭ-R P.617 практическая формула, являющаяся функцией от частоты, диаметра антенны, угла рассеяния и цены деления шкалы в вертикальном направлении.

## 6.3 Угловое разнесение

На приемной антенне используются вертикально размещенные облучатели для создания различных разнесенных по вертикали общих объемов, как и при вертикальном пространственном разнесении. В системах с двойным разнесением сигнал передается в одном луче и принимается в двух разнесенных лучах с разными углами прихода. Хотя два луча могут быть также разнесены по горизонтали, было обнаружено, что вертикальное разнесение дает лучшие результаты [Roda, 1988 г.]. В системах с четырехкратным разнесением сигнал передается на одной частоте в двух разных лучах, создавая четыре общих объема, как показано на Рисунке 21.

Различные трассы являются достаточно некоррелированными. Но необходимо проявлять осторожность. Поскольку в них могут быть различные ослабления. Практичная формула для углового разнесения лучей приводится в Рекомендации МСЭ-R P.617.

РИСУНОК 21  
Угловое разнесение



#### 6.4 Разнесение по поляризации

Имеются экспериментальные подтверждения, что такая конфигурация не дает выигрыша за счет разнесения. Однако когда она используется совместно с пространственным разнесением (смотрите Рисунок 21), разнесение по поляризации позволяет разделить два сигнала, передаваемых на одной частоте с ортогональными поляризациями, а на приемной антенне за счет ортогональных датчиков в облучателе.

#### 6.5 Разнесение по времени

Информационный сигнал многократно повторяется с интервалами, превышающими величину, обратную частоте замираний. Разнесение по времени может быть получено в ситуациях многолучевости, когда передаются сигналы достаточно широкополосные  $B > B_c$ . Так что многолучевость может рассматриваться как создание множество отражений. Такое разнесение из-за многолучевости, названное Рода (Roda [1988 г.]) неявным разнесением, может быть обеспечено за счет использования специальных методов модуляции, кодирования сигнала и т. д. практическими примерами этого метода являются скачки частоты и адаптивное выравнивание.

#### 6.6 Комбинированные методы

Существует четыре применяемых на практике типа систем с комбинированным разнесением:

- a) *Разнесение сканирования*: селектор сканирует каналы в фиксированной последовательности, пока не найдет сигнал с уровнем выше некоторого порога, использует этот сигнал, пока его уровень не упадет ниже порогового, и затем сканирует другие каналы в той же самой фиксированной последовательности пока снова найдет сигнал с уровнем выше порога.
- b) *Разнесение с селекцией*: это усложненная версия вышеописанного метода переключения, где вбирается наилучшие из имеющихся сигналов.
- c) *Разнесение с максимальным отношением*: до объединения разнесенные сигналы усиливаются с коэффициентом, обратно пропорциональным мощности шума с целью получения комбинированного отношения сигнал-шум, которое в любой момент времени было бы равно или лучше наилучшего значения отношения сигнал-шум у исходных сигналов.
- d) *Разнесение с равным усилением сигнала*: все разнесенные сигналы объединяются после усиления с одинаковым коэффициентом.

Сравнение методов выбора максимального отношения и равного усиления показано на Рисунках 22 и 23 для двойного и четырехкратного разнесения, соответственно [Brennan, 1959 г.].

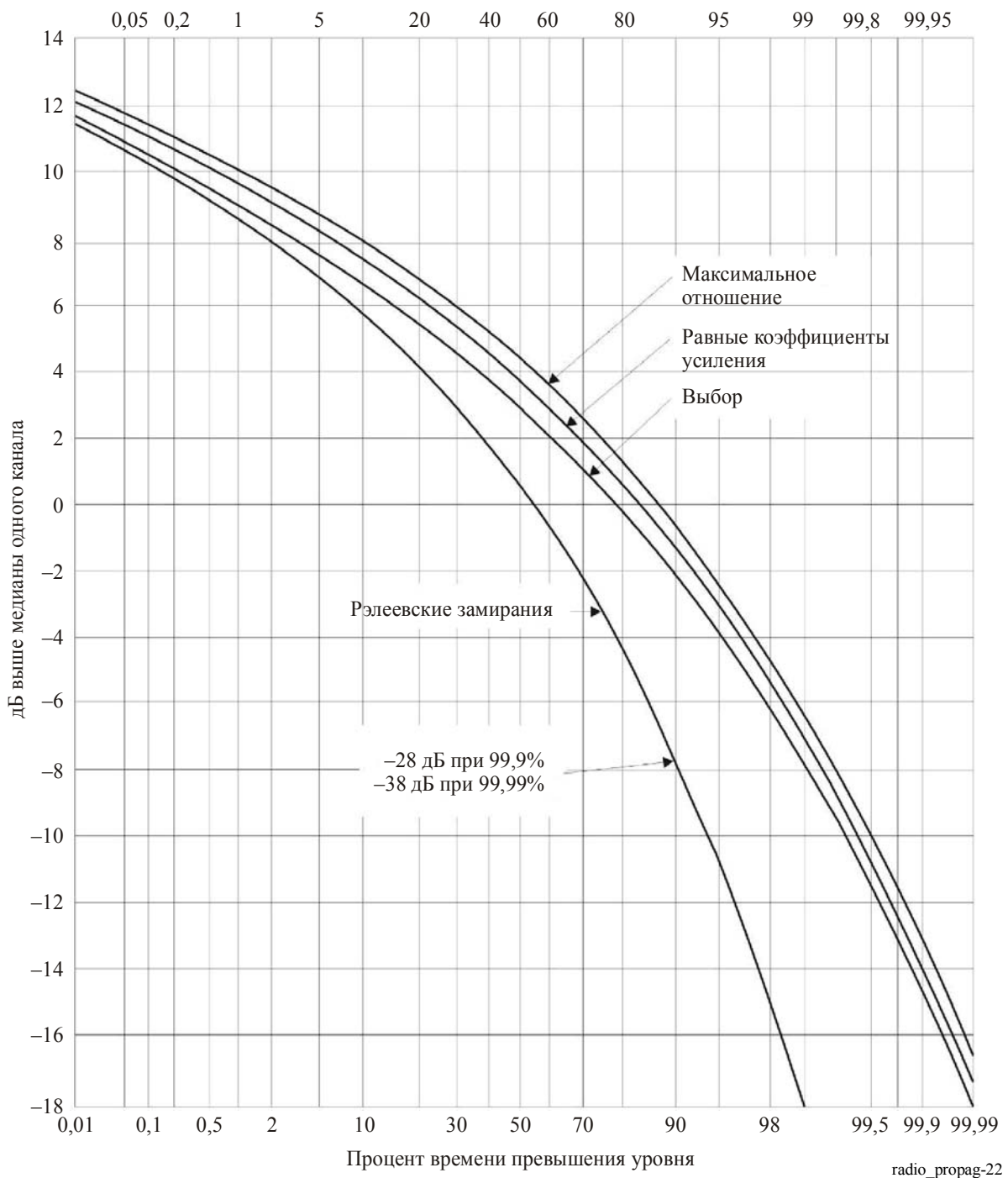
Наиболее часто используется комбайнер по максимальному отношению сигнал-шум, хотя метод равного усиления может привести к упрощению оборудования, в обмен на вполне скромную жертву в качестве (примерно 1 дБ для четырехкратного разнесения).

#### 6.7 Выигрыш за счет разнесения

На Рисунках 22 и 23 можно видеть, что использование разнесения приводит к получению выигрыша за счет разнесения для всех процентов времени и что это улучшение повышается с ростом величины процентов времени. Например, при использовании двойного разнесения с выбором, выигрыш за счет разнесения составит 15 дБ для 99,9% времени, тогда как сигнал на 28 дБ ниже среднего усиливается до значения на 13 дБ ниже среднего.

Однако необходимо отметить, что термин "выигрыш за счет разнесения" широко используемый для описания эффективности различных конфигураций разнесения, не является стандартным определением. Например, в некоторых случаях этот термин имеет значение разнесения, которое уменьшает процент времени, в течение которого сигнал падает до неприемлемых уровней.

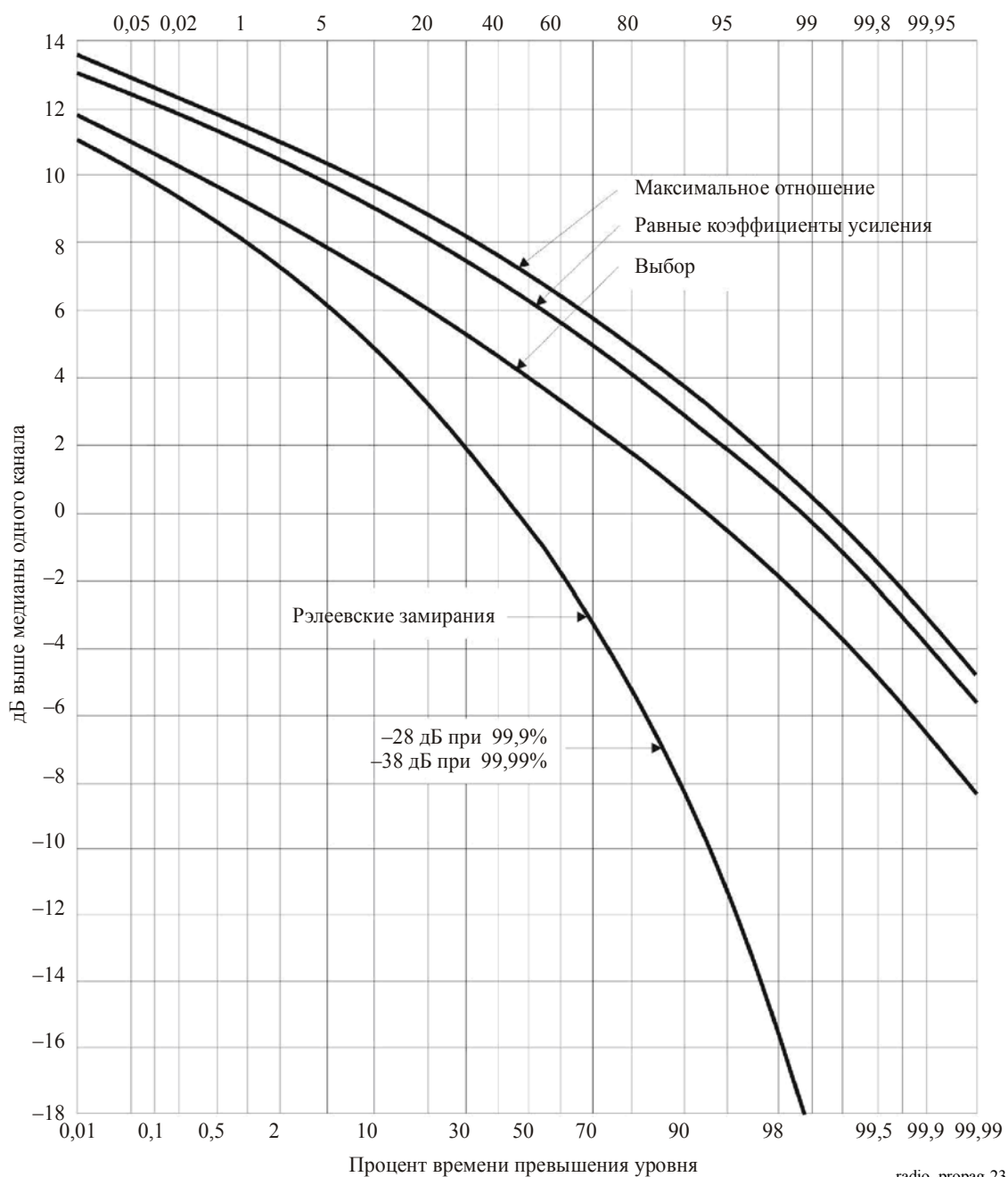
РИСУНОК 22  
Кривые распространения при двойном разнесении



radio\_propag-22

РИСУНОК 23

## Кривые распространения при четырехкратном разнесении



## Справочные документы

- ASSIS, M. S. [1971] A simplified solution to the problem of multiple diffraction over rounded obstacles. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 19, p. 292-295.
- ASSIS, M. S. [1982] Effect of lateral profile on diffraction by natural obstacles. *Radio Sci.*, Vol. 17, 5, p. 1051-1054.
- ASSIS, M. S. [1986] Tropospheric propagation at low latitude areas. IEEE Global Telecommunications Conference, Houston, TX, United States of America.

- BARNETT, W. T. [1979] Microwave line-of-sight propagation with and without frequency diversity. *Bell BSTJ*, Vol. 49, 8, p. 1827-1871.
- BATTESTI, J. and BOITHIAS, L. [1971] Nouveaux éléments sur la propagation par hétérogénéités de l'atmosphère. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 26, p. 15-20.
- BEACH, C. D. and TRECKER, J. M. [1963] A method for predicting interchannel modulation due to multipath propagation in FM and PM tropospheric radio systems. *BSTJ*, Vol. 42, p. 1-36.
- BELLO, P. A. [1969] A troposcatter channel model. *IEEE Trans. Comm. Techn.*, Vol. 17, p. 130-137.
- BOITHIAS, L. [1983] *Propagation des Ondes Radioélectriques dans l'Environnement Terrestre*. Editions Dunod, Paris, France.
- BOITHIAS, L. and BATTESTI, J. [1964] Etude expérimentale de la baisse de gain d'antenne dans les liaisons transhorizon. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 19, 9-10, p. 221-229.
- BOITHIAS, L. and BATTESTI, J. [1965] Les faisceaux hertziens transhorizon de haute qualité. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 20, 7-8, p. 138-150.
- BOITHIAS, L. and BATTESTI, J. [1983] Propagation due to tropospheric inhomogeneities. *Proc. IEE*, Vol. 130, Part F, 7, 657-664.
- BOOKER, H. G. and GORDON, W. E. [1950] A theory of radio scattering in the troposphere. *Proc. IRE*, Vol. 38, p. 401-412.
- BORN, M. and WOLF, E. [1970] *Principles of optics*. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom.
- BREMMER, H. [1949] *Terrestrial Radio Waves*. Elsevier Publishing Co., Amsterdam, Netherland.
- BRENNAN, D. G. [1959] Linear diversity combining techniques. *Proc. IRE*, Vol. 47, p. 1075-1102.
- BULLINGTON, K. [1947] Radio propagation at frequencies above 30 Mc/s. *Proc. IRE*, Vol. 35, 10, p. 1122-1136.
- CRYSDALE, J. H. [1958] Comparison of some experimental terrain diffraction losses with predictions based on Rice's theory for diffraction by a parabolic cylinder. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 6, p. 293-295.
- DEYGOUT, J. [1966] Multiple knife-edge diffraction of microwaves. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 14, p. 480-489.
- DOUGHERTY, H. T. and MALONEY, L. J. [1964] Application of diffraction by convex surfaces to irregular terrain situations. *Radio Sci.*, J. Res. NBS, Vol. 68D, p. 239-250.
- DOUGHERTY, H. T. and WILKERSON, R. E. [1967] Determination of antenna height for protection against microwave diffraction fading. *Radio Sci.*, Vol. 2, p. 161-165.
- DU CASTEL, F. [1966] *Tropospheric radiowave propagation beyond the horizon*. Pergamon Press, New York, United States of America.
- EKLUND, F. and WICKERTS, S. [1968] Wavelength dependence of microwave propagation far beyond the radio horizon. *Radio Sci.*, Vol. 3, 11, 1066-1074.
- ELIADES, D. E. [1993] Alternative derivation of the cascaded cylinder diffraction model. *Proc. IEE*, Part H, Vol. 140, p. 279-284.
- EPSTEIN J. and PETERSON, D. W. [1953] An experimental study of wave propagation at 850 Mc/s. *Proc. IRE*, Vol. 41, 5, p. 595-611.
- FEHLHABER, L. [1967] Selektiver Schwund, übertragbare Bandbreite und Frequenzdiversity auf troposphärischen Scatterstrecken im Frequenzbereich zwischen 1 GHz und 10 GHz. *Tech. Ber. FTZ*, No. 5589.
- FEHLHABER, L. and GROSSKOPF, J. [1967] Das elektromagnetische Feld am Empfangsort einer troposphärischen Scatterstrecke. *NTZ*, Vol. 20, p. 511-520.
- FOCK, V. A. [1965] *Electromagnetic diffraction and propagation problems*. Pergamon Press, New York, United States of America.
- FRIIS, H. T., CRAWFORD, A. B. and HOGG, D. C. [1957] A reflection theory for propagation beyond the horizon. *BSTJ*, Vol. 36, p. 627-644.
- FURUTSU, K. [1963] On the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth. *J. Res. NBS*, Vol. 67D, p. 39-62.

- FURUTSU, K. and WILKERSON, R. E. [1970] Obstacles gain in radio-wave propagation over inhomogeneous earth. *Proc. IEE*, Vol. 117, p. 887-893.
- FURUTSU, K. and WILKERSON, R. E. [1971] Optical approximation for the residue series for terminal gain in radio-wave propagation over inhomogeneous earth. *Proc. IEE*, Vol. 118, p. 1197-1202.
- GIOVANELI, C. L. [1984] An analysis of simplified solutions for multiple knife-edge diffraction. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 32, p. 297-301.
- HALL, M. P. M. [1979] *Effects of the troposphere on radio communications*. Peter Peregrinus Ltd, Stevenage, United Kingdom.
- HUFFORD, G. A. [1952] An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface. *Quart. J. Appl. Math.*, Vol. 9, p. 391-404.
- LARSEN, R. [1980] Quadruple space diversity in troposcatter systems. *Marconi Rev.*, p. 28-55.
- MEDHURST, R. G. [1959] Echo distortion in frequency modulation. *Electron. Radio Eng.*, Vol. 36, p. 253-259.
- MILLINGTON, G. [1949a] Ground wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. *Proc. IEE*, Part III, Vol. 96, p. 53-64.
- MILLINGTON, G. [1949b] Ground wave propagation across a land/sea boundary. *Nature*, Vol. 163, p. 128.
- MILLINGTON, G. and ISTEAD, G. A. [1950] Ground wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. *Proc. IEE*, Part III, Vol. 97, p. 209-222.
- MILLINGTON, G.; HEWITT, R. and IMMIRZI, F. S. [1962] Double knife-edge diffraction in field-strength prediction. *Proc. IEE*, Vol. 109C, p. 419-429.
- MONTEATH, G. D. [1951] Applications of the compensation theorem to certain radiation and propagation problems. *Proc. IEE*, Vol. 98, p. 23-30.
- OTT, R. H. [1971] An alternative integral equation for propagation over irregular terrain II. *Radio Sci.*, Vol. 6, p. 429-435.
- OTT, R. H. and BERRY, L. A. [1970] An alternative integral equation for propagation over irregular terrain. *Radio Sci.*, Vol. 5, p. 767-771.
- PANTHER, P. F. [1972] *Communications systems design – Line-of-sight and troposcatter systems*. McGraw-Hill, New York, United States of America.
- POGOZELSKI, R. J. [1980] A note on some common diffraction links models. *Radio Sci.*, Vol. 17, p. 1536-1540.
- RICE, P. L.; LONGLEY, A. G.; NORTON, K. A. and BARSIS, A. P. [1965 (Rev. 1967)] Transmission loss predictions for tropospheric communications circuits. NBS Tech. Note 101, Vols. 1 and 2, U.S. Dep. of Commerce. (Available as AD687-820, Natl. Tech Inf. Serv., Springfield, Va.)
- RODA, G. [1988] *Troposcatter radio links*. Artech House, Boston, United States of America.
- SHARPLES, P. A. and MEHLER, M. J. [1989] Cascaded cylinder model for predicting terrain diffraction loss at microwave frequencies. *Proc. IEE*, Part H, Vol. 136, p. 331-337.
- SUNDE, E. D. [1964] Intermodulation distortion in analog FM troposcatter systems. *BSTJ*, Vol. 43, p. 399-435.
- SURENIAN, D. [1965] Experimental results of angle diversity system tests. *IEEE Trans. Comm. Techn.*, Vol. 13, p. 208-219.
- VOGLER, L. E. [1982] An attenuation function for multiple knife-edge diffraction. *Radio Sci.*, Vol. 17, 6, p. 1541-1546.
- WAIT, J. R. [1974] Recent analytical investigations of electromagnetic ground wave propagation over inhomogeneous earth models. *Proc. IEEE*, Vol. 62, p. 1061-1072.
- WAIT, J. R. and CONDA, A. M. [1959] Diffraction of electromagnetic waves by smooth obstacles for grazing angles. *J. Res. NBS*, Vol. 63D, p. 181-197.
- ZHANG, M. [1977] Tropospheric scatter propagation. Monograph of China Research Institute of Radiowave Propagation.
- ZHANG, M. [1988] An Improved method for predicting the transmission loss due to troposcatter. International Symposium on Radio Propagation, Beijing, P. R. China.



## ЧАСТЬ 3

### ЛИНИИ СВЯЗИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

#### 1 Введение

Эта часть Справочника МСЭ-R относится к планированию и проектированию оптических линий для связи в свободном пространстве (FSO). Она содержит основную информацию о методах расчета различных слагаемых суммарного ослабления в таких линиях, описанных в Рекомендации МСЭ-R P.1817. Также включено краткое обсуждение дополнительных вопросов, которые будут должны учитываться при проектировании систем FSO, и пример применения.

#### 2 Исходные положения проектирования линий FSO

При разработке линий FSO необходимо рассмотреть несколько явлений, включая потери на поглощение в атмосфере, рассеяние в атмосфере и турбулентность атмосферы, условия микроклимата и местные эффекты, протяженность линии и неточность наведения. Кроме того, необходимо рассмотреть проблемы выбора длины волны и скорости передачи данных, вопросы защиты зрения и ослабление из-за окружающего солнечного света.

Для работы систем FSO требуется прямая видимость (LOS). При проверке наличия LOS, поскольку системы FSO используют расширение луча и параллельные лучи, необходимо предусмотреть просветы между центром луча и любыми препятствиями, равные радиусу луча. Этот фактор отличает такие системы от систем радиосвязи, где требуется просвет размером с зону Френеля.

Основным недостатком систем FSO является их подверженность влиянию атмосферных явлений, таких как ослабление и мерцания, которые могут понизить надежность линии. Узкий луч также приводит к тому, что точное наведение терминала лазерной связи становится более критичным, чем для обычных радиосистем.

Ключевым параметром проектирования линий FSO является расчет бюджета линии. Запас на линии  $M_{link}$  (дБ), который представляет собой доступную мощность, превышающую чувствительность приемника, можно рассчитать из уравнения:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{system}, \quad (195)$$

где:

- $P_e$ : общая мощность излучателя (дБм);
- $S_r$ : чувствительность приемника, которая также зависит от ширины полосы (скорости передачи данных) (дБм);
- $A_{geo}$ : геометрическое ослабление линии из-за рассеивания передаваемого луча с увеличением расстояния (дБ);
- $A_{atmo}$ : ослабление в атмосфере из-за поглощения и рассеяния (дБ);
- $A_{scintillation}$ : ослабление из-за турбулентности атмосферы (дБ);
- $A_{system}$ : все остальные потери в системе, включая ошибки в наведении луча, оптические потери приемника, потери из-за отклонения луча, уменьшение чувствительности из-за окружающей освещенности (солнечного излучения) и т. п.

В последующих параграфах приводятся определения и вычисления этих значений, а также исходные соображения по планированию линий FSO.

Выбор подходящего положения линии является важным вопросом для успешной работы системы FSO. Для того чтобы обеспечить оптимальную производительность линии, при настройке линий FSO должны учитываться преобладающие погодные условия, физические препятствия, типы поверхностей вдоль трассы, монтажные устройства приемопередатчика.

#### Погода

- Погодные условия и, в частности, местный климат в окрестностях выбранной для линии трассы будут влиять на появление снега, дождя, измороси, тумана, атмосферной дымки, частичек распыленных веществ, которые называются аэрозолями, пыли/песка, которые приводят к поглощению и рассеянию передаваемого сигнала.

### Характеристики трассы

- Физических препятствий на трассе между излучателем и приемником следует избегать. Обязательно стоит заметить, что крупные деревья могут расти на 0,5–1 м в год, и плотность их листвы в течение года меняется.
- Линии между зданиями должны учитывать тепловые потоки, которые могут привести к тому, что горячий воздух будет подниматься, пересекая трассу линии и приводя к появлению турбулентности, результатом которой может стать заметное мерцание на приемнике.
- На качество линии могут заметно повлиять топография и тип поверхности, лежащей под трассой прямой видимости FSO. На линиях FSO, пересекающих долины рек или открытое море, частым явлением может быть туман. Находящиеся под линией связи здания и сооружения могут стать причиной дополнительной тепловой активности в воздухе над ними, что может привести к усилению мерцания принимаемого сигнала.

### Монтаж приемопередатчика

- У большинства систем FSO очень узкий луч, и, в результате, точность установки излучателя и приемника является критичным параметром; любые неточности установки могут привести к значительным потерям сигнала. Телескопические мачты должны быть устойчивыми, а для надежного качества на протяжении длительного периода времени считается важным устанавливать оборудование непосредственно на несущих стенах, или сверху одной колонны. Движение в результате дифференциальных термальных расширений или вибраций под воздействием ветра, должно быть сведено к минимуму.

## 3 Геометрические ослабления

Даже при ясной погоде луч расходится, и в результате детектор принимает сигнал меньшей мощности. Ослабление из-за рассеивания передаваемого луча с увеличением расстояния называется геометрическим ослаблением, и оно вычисляется по формуле (196):

$$A_{geo} \text{ (дБ)} = 10 \log_{10} \left( \frac{S_d}{S_{capture}} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{\frac{\pi}{4} (d \theta)^2}{S_{capture}} \right), \quad (196)$$

где:

- $S_d$ : площадь поверхности луча передачи в диапазоне на расстоянии,  $d$ ,
- $S_{capture}$ : площадь поглощения приемника ( $\text{м}^2$ ),
- $\theta$ : угол расхождения луча (мрад),
- $d$ : расстояние между излучателем и приемником (км).

## 4 Атмосферные ослабления из-за поглощения и рассеяния

Оптические линии для связи в свободном пространстве (FSO) повреждаются из-за поглощения и рассеяния света под воздействием атмосферы Земли. Атмосфера взаимодействует со светом благодаря своему составу, в который обычно входят множество различных видов молекул, небольших распыленных частиц (аэрозоли, туман) и оседающих частиц (дождь, снег и град).

Ослабление лазерной мощности описывается законом Бирса [Weichel, 1990 г.]:

$$\tau(\lambda, d) = \frac{P(\lambda, d)}{P(\lambda, 0)} = \exp\{-\gamma(\lambda) \cdot d\}, \quad (197)$$

где:

- $\tau(\lambda, d)$ : коэффициент прозрачности в диапазоне  $d$  при длине волны  $\lambda$ ,
- $P(\lambda, d)$ : лазерная мощность в диапазоне  $d$ ,
- $P(\lambda, 0)$ : лазерная мощность от источника,
- $\gamma(\lambda)$ : ослабление или полный коэффициент ослабления на единицу длины.

Коэффициент ослабления состоит из двух частей:

$$\gamma(\lambda) = A_a + S_a, \quad (198)$$

где  $A_a$  – коэффициент поглощения ( $A_a$  представляет сумму всех потенциальных коэффициентов поглощения, т. е. молекулярное поглощение, аэрозольное поглощение) и  $S_a$  – коэффициент рассеяния ( $S_a$  представляет сумму всех потенциальных коэффициентов рассеяния, т. е. молекулярное рассеяние, аэрозольное рассеяние, рассеяние в тумане и т. д.).

Атмосферное ослабление  $A_{atmo}$  может быть представлено как сумма двух слагаемых:

$$A_{atmo} = A_{clear\_air} + A_{excess}, \quad (199)$$

где:

- $A_{clear\_air}$ : ослабление в условиях чистого воздуха (из-за наличия молекул газа),
- $A_{excess}$ : ослабление из-за возможного наличия тумана, легкого тумана, легкой пасмурности, изморози, дождя, снега, града.

Атмосфера – эта среда передачи, изменяющаяся во времени, и, в результате  $A_{atmo}$  является стохастическим процессом. Однако установление пределов готовности системы и влияние этого процесса, как правило, рассматривается статистически. Запас на линии  $M_{link}$  представляет собой величину ослабления, которая может быть допустимой в данной системе на данном расстоянии.

#### 4.1 Ослабление в условиях ясного неба

Ослабление в условиях ясного неба в основном является ослаблением вследствие поглощения молекулами газов. Атмосферное поглощение на определенных длинах оптических волн является результатом взаимодействия фотонов с атомами и молекулами ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$  и т. д.), что приводит к поглощению молекулой столкнувшегося с ней фотона и повышению ее температуры. Коэффициент поглощения зависит от типа молекул газа и их концентрации.

Молекулярное поглощение является селективным явлением, приводящим к спектральному пропусканию атмосферы, создавая зоны прозрачности, называемые атмосферными окнами прозрачности, и непрозрачные зоны, называемые атмосферными окнами непрозрачности [Bouchet и др., 2005 г. и Andrews и Phillips, 2005 г.]. Важные атмосферные молекулы, имеющие высокое поглощение в инфракрасном диапазоне – вода,  $CO_2$ , озон и  $O_3$ . На Рисунке 24 представлено конкретное ослабление, вычисленное с использованием программы LOWTRAN 7, вследствие атмосферных газов диапазоне частот ( $1/\lambda$ ) от 20 до 14 000  $cm^{-1}$  – от 600 ГГц до 420 ТГц [Gibbins, 1999 г.]. Поскольку размер молекул газов намного меньше длины волны, то ослабление из-за рассеяния на молекулах газов незначительно. [Pratt, 1969 г.].

Обычно лазерные длины волн выбираются так, чтобы они попадали в атмосферные окна прозрачности так, чтобы  $A_{clear\_air}$  было незначительным [Weichel, 1990 г.]. Длины волны, обычно используемые в системах FSO, расположены вблизи 690, 780, 850 и 1 550 нм. Однако по сравнению с относительно незагрязненными пригородными районами, для работы в плотно застроенной городской местности с высоким содержанием в воздухе частичек распыленных веществ, может быть выгодным использовать другие длины волн.

#### 4.2 Чрезмерное ослабление

Чрезмерное ослабление оценивается как ослабление, вызванное случайным наличием частиц тумана, легкого тумана, легкой пасмурности, изморози, дождя и снега. Наличие этих частичек приводит к угловому перераспределению падающего светового потока, которое называется рассеянием, и уменьшает дальность распространения потока в заданном направлении. Однако здесь не происходит потери энергии, аналогичной поглощению. Тип рассеяния определяется физическим размером неоднородностей, на которых происходит рассеяние, по отношению к длине волны передающего лазера. В Таблице 7 показано три различных режима рассеяния, зависящих от размера неоднородностей, на которых происходит рассеяние, с приблизительного соотношения длиной волны и коэффициентом ослабления для данного типа рассеяния (эффективного сечения). Кроме того, в Таблице 7 показаны типы неоднородностей, на которых происходит рассеяние в каждом режиме для длин волн видимого спектра или инфракрасного излучения [Kim и др., 2000 г.; McCartney, 1976 г. и Wallace и Hobbs, 1977 г.].

РИСУНОК 24

## Затухание в газах в диапазоне инфракрасных волн

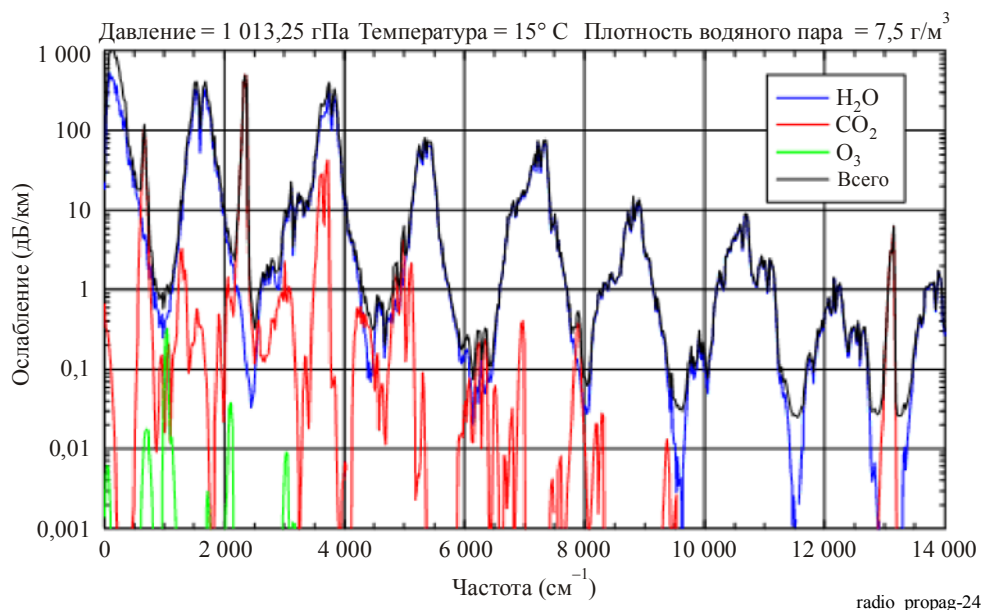


ТАБЛИЦА 7

**Режимы рассеяния в зависимости от размера неоднородностей, на которых происходит рассеяние  $r$  по сравнению с длиной волны передающего лазера  $\lambda$ . Кроме того, показана приблизительная взаимосвязь между длиной волны и коэффициентом ослабления для данного типа рассеяния  $Q(\lambda)$**

	Рэлеевское рассеяние	Рассеяние света на шаровых частицах	Неселективное или геометрическое рассеяние
	$r \ll \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r \approx \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1,6} - Q(\lambda) \sim \lambda^0$	$r \gg \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$
<b>Типы рассеяния</b>	Молекулы воздуха Легкая пасмурность	Град Туман Распыленные неоднородности	Туман Дождь Снег Град

Поскольку выражение  $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$  относится к рэлеевскому закону рассеяния на молекулах воздуха, его вклад в общий коэффициент ослабления незначителен [Pratt, 1969 г.].

Для частиц, которые имеют размер много больше длины волны, рассеяние может описываться формулами из геометрической оптики и зависимости от лазерной длины волны не будет. Капли дождя, снег, град, капли, входящие в состав облака, и густой туман геометрически рассеивают лазерный свет [Wallace и Hobbs, 1977 г.].

Для тех частичек, размеры которых сравнимы с длиной волны лазера, может применяться теория рассеяния Ми. Туман и распыленные неоднородности являются основными причинами процесса рассеяния Ми.

Можно использовать аналитический подход, в котором расчетные предсказания конкретного ослабления выполняются на основании предполагаемого распределения размеров частичек. Однако очень трудно смоделировать и измерить распределение размеров частичек любого распыленного вещества или тумана, которое является ключевым параметром для определения их физических или оптических свойств.

#### 4.2.1 Рассеяние света на шаровых частицах (оценка ослабления в тумане)

Поскольку аналитический подход не всегда можно использовать на практике, для расчета ослабления в результате рассеяния света на шаровых частицах специалисты в области FSO используют эмпирические методы. В этих методах коэффициент ослабления из-за рассеяния света на шаровых частицах связывается с видимостью.

Техническое определение видимости или дальности видимости звучит так – расстояние, на котором сила света ослабляется до 2% от его начальной силы, или качественная видимость – это расстояние, на котором едва возможно различить темный объект на горизонте [Middleton, 1952 г.]. Параметр видимости очень просто измеряется и хранится на метеостанциях или в базах данных аэропортов, он позволяет получить оценку возможного местного качества систем электросвязи, используя распределение этого параметра. Однако данные о видимости, собираемые в аэропортах, могут не всегда представлять условия, свойственные городской или сельской местности, которые могут существенно отличаться как по топографии, так и близости к водоемам.

Упрощенная эмпирическая формула, которую используют специалисты в области FSO для расчета ослабления в тумане,  $\gamma_{fog}(\lambda)$  (дБ/км), можно найти у [Weichel, 1990 г.]:

$$\gamma_{fog}(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left( \frac{\lambda}{550 \text{ нм}} \right)^{-q}, \quad (200)$$

где:

$V$ : видимость (км),

$\lambda$ : длина волны (нм),

$q$ : коэффициент, зависящий от распределения размеров рассеивающих частиц.

Он определен на основании данных экспериментов и имеет значения [Kim, 1997 г.; Middleton, 1952 г.], но до сих пор исследуется в экспериментах. Это указывается у [Weichel, 1990 г. и Pratt, 1969 г.] как:

$$\begin{aligned} q &= 1,6 & , & & \text{если} & & V > 50 \text{ км} \\ &= 1,3 & , & & \text{если} & & 6 \text{ км} < V < 50 \text{ км} \\ &= 0,585V^{1/3} & , & & \text{если} & & V < 6 \text{ км} . \end{aligned} \quad (201)$$

Для получения значения ослабления, превышаемого в течение данного процента времени  $p$ , т. е. для данной вероятности, в уравнение (205) требуется подставить значение видимости, которое не превышает в течение данного процента времени  $p$ . Недавно были предложены улучшения для вычислений ослабления в тумане, но они до сих пор исследуются в экспериментах [Al Naboulsi *и др.*, 2004 г. и Kim *и др.*, 2000 г.]. В Таблице 8 приведен Международный код видимости (IVC), который устанавливает соотношение погодных условий с дальностью видимости [Chu и Hogg, 1968 г. и McCartney, 1976 г.].

ТАБЛИЦА 8

Погодные условия Международного кода видимости [McCartney, 1976 г.] и выпадение осадков [Chu и Hogg, 1968 г.] наряду с их видимостью

Погодные условия	Выпадение осадков		Видимость
		мм/час	
Очень плотный туман			0 м
			50 м
Плотный туман			200 м
Умеренный туман			Легкий туман
Легкий туман	— Снег —	Шторм	
Очень легкий туман		Сильный дождь	
Легкая пасмурность			
		Средний дождь	
Очень легкая пасмурность			
		Легкий дождь	
Ясное небо			10 км
		Изморось	
			20 км
Очень ясное небо			23 км
			50 км

#### 4.2.2 Ослабление в дожде

Конкретное ослабление в дожде (дБ/км) в целом определяется соотношением [Carbonneau и Wisely, 1998 г.; Higomoto, 1997 г. и Akiba и др., 2004 г.]:

$$\gamma_{rain} = k \cdot R^{\alpha}. \quad (202)$$

Определено, что параметры  $\alpha$  и  $k$  зависят от местоположения, и в Таблице 9 приведены их измеренные значения:

ТАБЛИЦА 9

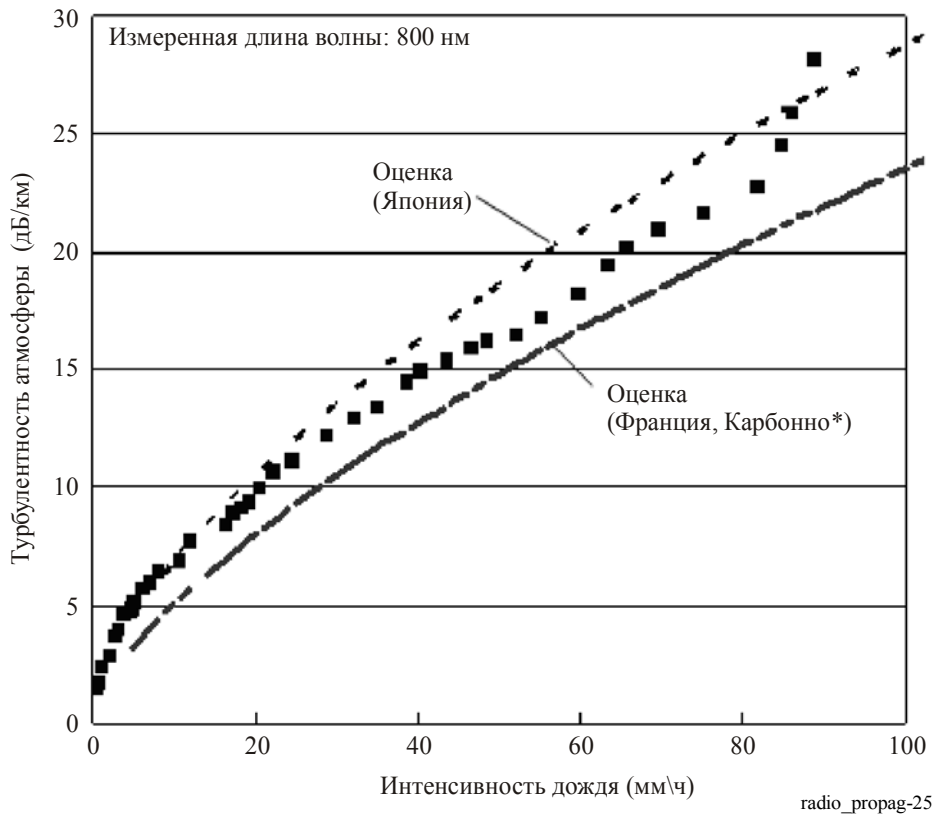
Параметры, используемые для оценки ослабления в дожде

Местоположение	$k$	$\alpha$
Япония	1,58	0,63
Франция	1,076	0,67

В Рекомендации МСЭ-R P.837 приводятся значения интенсивности дождя  $R(p)$  (мм/ч), превышаемые в течение любого данного процента времени среднего года ( $p$ ) и для всех мест размещения, а уравнение (206) определяет ослабление превышаемые в течение данного процента времени  $p$ .

На Рисунке 25 показано отношение между  $\gamma_{дождь}$  и коэффициентом интенсивности осадков  $R$  при помощи параметров из Таблицы 7 для данных, измеренных в Японии.

РИСУНОК 25  
Ослабление в атмосфере из-за дождя



### 4.2.3 Ослабление в снеге

Ослабление в снеге, как функция интенсивности снегопада описывается следующим соотношением:

$$\gamma_{snow} = a \cdot S^b, \tag{203}$$

где:

$\gamma_{snow}$ : конкретное ослабление в снеге (дБ/км),

$S$ : интенсивность снегопада (мм/час),

$a$  и  $b$ : функции от длины волны и определены последующим отношением в зависимости от длины волны  $\lambda$  (нм).

ТАБЛИЦА 10

## Параметры, используемые для оценки ослабления в снеге

	<i>a</i>	<i>b</i>
Мокрый снег	$0,0001023\lambda + 3,7855466$	0,72
Сухой снег	$0,0000542\lambda + 5,4958776$	1,38

## 5 Влияние сцинтилляции

Второй по значимости атмосферный процесс, который влияет на качество лазерных систем связи – это обусловленные турбулентностью атмосферные сцинтилляции, которые приводят к заметным колебаниям мощности принимаемого сигнала.

Турбулентность атмосферы приводит к появлению временных воздушных ячеек, имеющих немного разную температуру, с различной плотностью и различными индексами рефракции. Данные могут быть потеряны из-за отклонения луча и сцинтилляций, поскольку луч лазера, проходя через эти неоднородности с различным индексом рефракции, меняет направление распространения. Значимость каждого эффекта зависит от отношения размера этих ячеек турбулентности к диаметру луча лазера.

Если размеры ячеек турбулентности больше диаметра луча, то весь луч лазера целиком беспорядочно искривляется, что приводит к полной потере сигнала, если луч отклоняется в сторону от апертуры приемника [Weichel, 1990 г. и Kim и др., 1998 г.]. В случае блуждания луча, блуждание луча в более длинных волнах будет меньше, чем в более коротких, хотя зависимость от длины волны невелика. Хотя поддерживать узкий луч на всей трассе может быть сложно, интенсивность флуктуации невелика (меньше кГц или двух), так что можно использовать систему слежения.

Более широко распространена ситуация, когда размеры ячеек турбулентности меньше диаметра луча, при этом искривление луча и дифракция приводит к искажениям фронта волны луча лазера [Weichel, 1990 г.]. Это приводит к флуктуациям интенсивности луча лазера во времени, которые называются сцинтилляциями, на приемнике с частотой флуктуаций от 0,01 Гц до 200 Гц.

Влияние тропосферных сцинтилляций обычно описывается в виде логарифма амплитуды  $\chi$  (дБ) наблюдаемого сигнала ("логарифмической амплитуды"), определяемого как выраженное в децибелах отношение мгновенной амплитуды к среднему значению амплитуды. Интенсивность и частота флуктуаций (частота сцинтилляций) растут с увеличением длины волны. Для плоской волны и слабой турбулентности изменение сцинтилляций  $\sigma_\chi^2$  (дБ<sup>2</sup>) может быть выражено следующим уравнением:

$$\sigma_\chi^2 = 23,17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6}, \quad (204)$$

где:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{номер волны (м}^{-1}\text{);}$$

$$L : \text{протяженность линии связи (м);}$$

$$C_n^2 : \text{структурный параметр индекса рефракции (м}^{-2/3}\text{).}$$

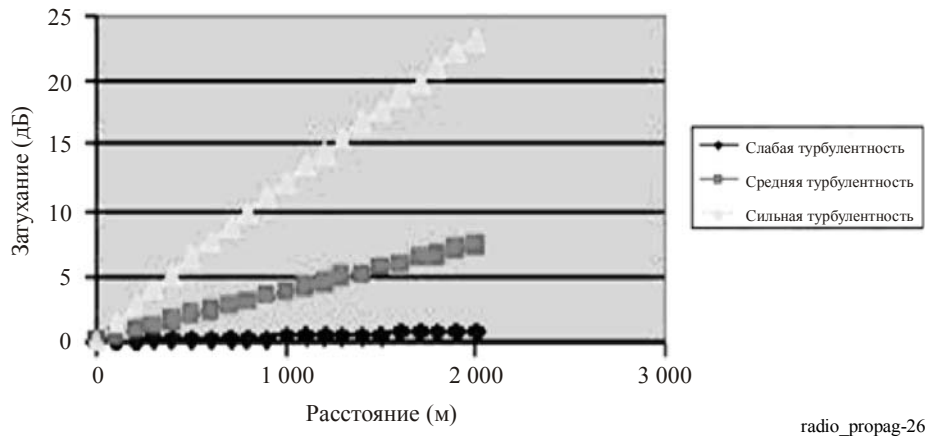
Сцинтилляции имеют пик амплитуды, равный  $4\sigma_\chi$ , и ослабление из-за сцинтилляций равно  $2\sigma_\chi$ . При сильной турбулентности наблюдается насыщение изменения, определяемого вышеприведенным соотношением [Bataille, 1992 г.]. Параметр  $C_n^2$  на оптических частотах имеет значение, отличное от значения для миллиметровых волн [Vasseur и др., 1997 г.]. Сцинтилляции на миллиметровых волнах обусловлены, главным образом, флуктуациями влажности, тогда как сцинтилляции на оптических частотах являются, в основном, функцией температуры. На миллиметровых волнах параметр  $C_n^2$  примерно равен  $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$  (обычно, на миллиметровых волнах  $C_n^2$  принимает значение от  $10^{-14}$  до  $10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$ ), а на оптических частотах значение  $C_n^2$  примерно равно  $2 \times 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$  при слабой турбулентности (обычно, на оптических частотах  $C_n^2$  принимает значение от  $10^{-16}$  до  $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ ) [Bataille, 1992 г.].



На Рисунке 26 представлено колебание ослабления оптического луча с длиной волны 1,55 мкм для разных типов турбулентности на расстояниях до 2000 м. Очевидно, что ослабление увеличивается, когда возрастает турбулентность. В Таблице 11 перечисляются воздействия турбулентности на распространение оптических и радиоволн. Следует отметить, что сцинтилляции определенно оказывают более сильное воздействие на оптические лучи с меньшими длинами волн.

РИСУНОК 26

Изменение затухания вследствие сцинтилляций в соответствии с расстоянием для различных типов турбулентности на 1,55 мкм



radio\_propag-26

ТАБЛИЦА 11

Краткие сведения об ослаблении из-за сцинтилляций

	Турбулентность		
	Низкая	Низкая	Низкая
Оптические волны $C_n^2$ (м <sup>-2/3</sup> )	$10^{-16}$	$10^{-14}$	$10^{-13}$
Ослабление (0,98 мкм) (дБ)	0,51	5,06	16,00
Ослабление (1,55 мкм) (дБ)	0,39	3,87	12,25
Миллиметровые волны $C_n^2$ (м <sup>-2/3</sup> )	$10^{-15}$	$10^{-13}$	$10^{-12}$
Ослабление (40 ГГц) (дБ)	0,03	0,09	0,27
Ослабление (60 ГГц) (дБ)	0,03	0,11	0,35

Сцинтилляционные флуктуации можно уменьшить, используя либо несколько передающих лучей, либо большие апертуры приемника [Churnside, 1991 г. и Kim и др., 1997 г.]. Кроме того, для сведения к минимуму влияния сцинтилляций на трассу передачи, не следует устанавливать системы FSO вблизи горячих поверхностей. Поскольку с ростом высоты сцинтилляция уменьшается, рекомендуется, чтобы системы FSO размещались несколько выше крыш (>1 м) и вдали от боковой стены зданий, если системы размещаются в местности, подобной пустыне.

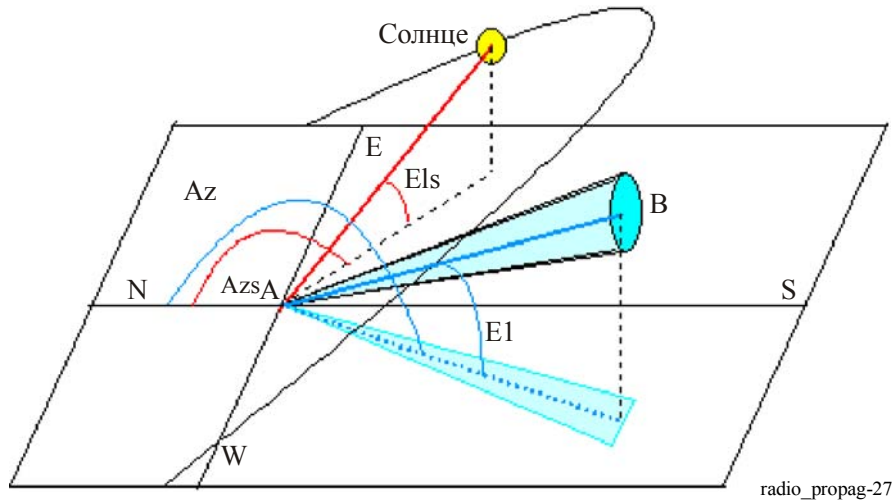
## 6 Ослабление из-за окружающего света

Солнечная засветка возникает, когда солнце или его отражение располагается в мгновенном секторе обзора (IFOV) оптического приемника. IFOV приема, как правило, имеет, как минимум, такой же размер, как и угол расхождения передачи. Эта проблема становится серьезной, когда положение солнца параллельно оптической линии, и энергия солнца, попадающая внутрь приемника, больше, чем энергия света, принимаемого от излучателя.

Солнечные помехи, обычно, можно уменьшить, расположив приемник так, чтобы солнце было всегда вне главной оси приема. На Рисунке 27 показана геометрия пути движения солнца по небу относительно оптической линии для связи в свободном пространстве (А – приемник, В – излучатель).

РИСУНОК 27

Схематический путь солнца относительно оптической линии в свободном пространстве



Мощность, излучаемая Солнцем,  $P_{radiated}$  ( $W/m^2$ ) определяется при помощи следующего уравнения:

$$P_{radiated} = 1200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{ls}\right), \quad (205)$$

где  $E_{ls}$  – высота Солнца (рад).

Принимаемая мощность вычисляется по формуле:

$$P_{solar} = F_{solar} \cdot P_{radiated} \cdot S_{capture} \cdot W_{receiver} / 100, \quad (206)$$

где:

- $F_{solar}$  : спектральная мощность солнечного излучения как функция от длины волны,
- $S_{capture}$  : площадь поверхности волны, захватываемого приемником ( $m^2$ ),
- $W_{receiver}$  : ширина полосы частот приемника (нм),
- $F_{solar}$  : моделируется следующим соотношением:

$$\begin{aligned} F_{solar} = & 8,97162055148876 \times 10^{-13} \lambda^5 - 4,64912739129745 \times 10^{-9} \lambda^4 \\ & + 9,37072684333339 \times 10^{-6} \lambda^3 - 9,066632383289905 \times 10^{-3} \lambda^2 \\ & + 4,05479801934347 \lambda - 5,70237282654237, \end{aligned} \quad (207)$$

где  $\lambda$  длина волны (нм).

## 7 Другие проблемы

Другие факторы, которые следует учитывать при проектировании системы FSO, включают в себя следующие:

- Международные правила безопасности строго ограничивают максимальную выходную мощность оптических систем. При длине волны 1550 нм, регуляторы допускают мощность в 100 раз большую, чем для более коротких длин волн в целях "защиты глаз". Недостатком этого типа лазера является, главным образом, его высокая стоимость по сравнению с лазером, работающим на более коротких волнах примерно 850 нм.

- Приемопередатчики FSO могут располагаться за окнами. При этом критичным является угол между лучом и окном. Этот угол должен быть максимально близок к перпендикуляр, но слегка отличаться (на 5 градусов) для уменьшения обратного воздействия луча на приемник. Кроме того, некоторые окна сделаны из стекла или имеют защитное покрытие для уменьшения отблесков. Поскольку эти окна, зачастую, специально спроектированы так, чтобы не пропускать инфракрасные лучи, это покрытие может уменьшать сигнал на 60% или более.
- Плохая видимость может меньше эффективность и готовность систем FSO. Плохая видимость может возникать в определенное время года или суток. Кроме того, плохая видимость может быть локальным явлением (прибрежный туман). Одно из решений противостояния отрицательному влиянию плохой видимости заключается в сокращении расстояний между терминалами, что обеспечивает больший запас бюджета линии, позволяющий работать в плохих погодных условиях.

### 8 Пример применения

Пошаговая процедура, рекомендованная в Рекомендации МСЭ-R P.1814, применяется для расчета энергетических запасов линии связи для систем со следующими характеристиками:

Параметры системы		
Система А	Система А	Система А
Длина волны, $\lambda = 850$ нм	Длина волны, $\lambda = 850$ нм	Длина волны, $\lambda = 850$ нм
Общая выходная мощность, $P_e = 100$ мВт	Общая выходная мощность, $P_e = 100$ мВт	Общая выходная мощность, $P_e = 100$ мВт
Чувствительность приемника, $S_r = -46$ дБм	Чувствительность приемника, $S_r = -46$ дБм	Чувствительность приемника, $S_r = -46$ дБм
Площадь охвата приемника, $S_{capture} = 0,005$ м <sup>2</sup>	Площадь охвата приемника, $S_{capture} = 0,005$ м <sup>2</sup>	Площадь охвата приемника, $S_{capture} = 0,005$ м <sup>2</sup>
Расходимость луча, $\theta = 2$ мрад	Расходимость луча, $\theta = 2$ мрад	Расходимость луча, $\theta = 2$ мрад
Потери в системе, $A_{system} = 3$ дБ	Потери в системе, $A_{system} = 3$ дБ	Потери в системе, $A_{system} = 3$ дБ
Местонахождение: Франция	Местонахождение: Франция	Местонахождение: Франция
Длина трассы, $d = 500$ м	Длина трассы, $d = 1000$ м	Длина трассы, $d = 1000$ м

В условиях ясного неба:

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} - \gamma_{clear\_air} \cdot d^*$$

Параметры системы		
Система А	Система В	Система С
Геометрическое ослабление $A_{geo} = 21,96$ дБ	Геометрическое ослабление $A_{geo} = 27,98$ дБ	Геометрическое ослабление $A_{geo} = 40,02$ дБ
$M_{link} = 41,04$ дБм	$M_{link} = 35,02$ дБм	$M_{link} = 22,98$ дБм

\* Определенное ослабление в условиях ясного неба может считаться незначительным.

**В условиях тумана:**

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} - \gamma_{clear\_air} \cdot d - \gamma_{fog} \cdot d$$

**Видимость  $V = 200$  м**

Параметры системы		
Система А	Система В	Система С
$M_{link} = 32,61$ дБм	$M_{link} = 18,15$ дБм	$M_{link} = -4,49$ дБм

**Видимость  $V = 1000$  м**

$M_{link} = 39,52$ дБм	$M_{link} = 31,98$ дБм	$M_{link} = 10,83$ дБм
------------------------	------------------------	------------------------

**В условиях легкого дождя (интенсивность дождя  $R = 2,5$  мм/час):**

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} - \gamma_{clear\_air} \cdot d - \gamma_{rain} \cdot d$$

Параметры системы		
Система А	Система В	Система С
$M_{link} = 40,05$ дБм	$M_{link} = 33,03$ дБм	$M_{link} = 15,02$ дБм

**В условиях сильного дождя (интенсивность дождя  $R = 25$  мм/час):**

$$M_{link} = P_e - S_r - A_{system} - A_{geo} - \gamma_{clear\_air} \cdot d - \gamma_{rain} \cdot d$$

Параметры системы		
Система А	Система В	Система С
$M_{link} = 36,39$ дБм	$M_{link} = 25,72$ дБм	$M_{link} = -14,22$ дБм

**Справочные документы**

- AKIBA, M., WAKAMORI, K. and ITO, S. [2004] Measurement of optical propagation characteristics for free-space optical communication during rainfall. *IEICE Trans. Comm.*, Vol. E87-B, 7, p. 2053-2056.
- AL NABOULSI, M., SIZUN, H. and DE FORNEL, F. [2004] Fog attenuation prediction for optical and infrared waves. *Opt. Eng.*, Vol. 43, 2, p. 319-329.
- ANDREWS, L. C. and PHILLIPS, R. L. [2005] *Laser Beam Propagation through Random Media*. SPIE, Bellingham, Washington, United States of America.
- BATAILLE, P. [1992] Analyse du comportement d'un système de télécommunications optique fonctionnant à 0,83  $\mu\text{m}$  dans la basse atmosphère. Thèse de doctorat, Université de Rennes, France.
- BOUCHET, O., SIZUN, H., BOISROBERT, C., DE FORNEL, F. and FAVENNEC, P. N. [2005] *Free-Space Optics: Propagation and Communication*. Hermes, p. 214. ISBN: 978-1-905209-02-6 / 1-905209-02-9.
- CARBONNEAU, T. H. and WISELY, D. R. [1998] Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded market place. SPIE Conference on optical wireless communications, Vol. 3232, Boston, Massachusetts, United States of America.
- CHU, T. S. and HOGG, D. C. [1968] Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5 and 10.6 microns. *BSTJ*, Vol. 47, p. 723-759.
- CHURNSIDE, J. H. [1991] Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere. *Appl. Opt.*, 30, p. 1982-1994.
- GIBBINS, C. J. [1999] Propagation in the millimetric, submillimetric and infrared wavelength regions. A study for RACAL research. CCLRC RCRU-Rutherford Appleton Laboratory.
- HIROMOTO, N. [1997] Novel detector technologies for infrared communication and sensing. CRC International Topic Workshop on Space Laser Communication- Current Status and Future Perspectives, p. 90-95.
- KIM, I. I. *u op.* [1997] Measurement of scintillation and link margin for the TerraLink<sup>TM</sup> laser communication system. Wireless Technologies and Systems: Millimeter Wave and Optical. Proc. SPIE, 3232, p. 100-118.
- KIM, I. I., McARTHUR, B. and KOREVAAR, E. [2000] Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. Optical Wireless Communications III. Proc. SPIE, 4214, p. 26-37.
- McCARTNEY, E. J. [1976] *Optics of the Atmosphere*. J. Wiley & Sons, New York, United States of America.
- MIDDLETON, W. E. K. [1952] *Vision Through the Atmosphere*. University of Toronto Press.
- ONTAR [1999] *Fascode Atmospheric code: PcLn/Fascod 3P*. Published by ONTAR Corporation, North Andover, Massachusetts, United States of America.
- PRATT, W. K. [1969] *Laser Communications Systems*. J. Wiley & Sons, New York, United States of America.
- VASSEUR H. V., OESTGES, C. and VANDER VORST, A. [1997] Influence de la troposphère sur les liaisons sans fil aux ondes millimétriques et optiques. Propagation électromagnétique du décimétrique à l'angström, 3ièmes journées, Rennes, France.
- WALLACE, J. M. and HOBBS, P. V. [1977] *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, Orlando, United States of America.
- WEICHEL, H. [1990] *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, United States of America.
-







\* 3 3 6 1 9 \*

**Отпечатано в  
Швейцарии  
Женева, 2009 г.  
ISBN 92-61-12774-6**  
Фотографии представлены:  
Shutterstock