

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.1411-6
(02/2012)

**Данные о распространении радиоволн
и методы прогнозирования
для планирования наружных систем
радиосвязи малого радиуса действия
и локальных радиосетей в диапазоне
частот от 300 МГц до 100 ГГц**

Серия Р
Распространение радиоволн



Предисловие

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

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

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

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

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

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

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

Электронная публикация
Женева, 2012 г.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1411-6

Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования наружных систем радиосвязи малого радиуса действия и локальных радиосетей в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц

(Вопрос МСЭ-R 211/3)

(1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приводится руководство, касающееся распространения радиоволн наружных систем радиосвязи малого радиуса действия в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц. В ней приводится информация о моделях потерь на трассе в условиях прямой видимости (LoS) и вне прямой видимости (NLoS), о потерях на входе в здание, о моделях многолучевого распространения как для уличных каньонов, так и над крышами, о количестве компонентов сигнала, характеристиках поляризации и характеристиках замирания.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

принимая во внимание,

- a) что разрабатывается большое количество новых приложений подвижной и персональной связи малого радиуса действия (с рабочим диапазоном до 1 км);
- b) высокий спрос на локальные радиосети (RLAN) и системы беспроводного абонентского доступа;
- c) что системы малого радиуса действия, использующие очень низкую мощность, имеют много преимуществ при предоставлении услуг в среде подвижной связи и беспроводного абонентского доступа;
- d) что знание характеристик распространения радиоволн и помех, возникающих при работе нескольких пользователей в одной зоне, является критически важным для эффективного проектирования систем;
- e) наличие потребности как в общих (то есть не зависящих от местоположения) моделях и рекомендациях для первоначального планирования систем и оценки помех, так и в детерминистических (т. е. зависящих от местоположения) моделях для некоторых детальных оценок,

отмечая,

- a) что в Рекомендации МСЭ-R P.1238 содержится руководство по распространению радиоволн в диапазоне частот от 900 МГц до 100 ГГц внутри зданий и что ее следует использовать для тех ситуаций, в которых требуется учитывать условия внутри и вне зданий;
- b) что в Рекомендации МСЭ-R P.1546 содержится руководство по распространению радиоволн для систем, работающих на расстоянии 1 км и более в диапазоне частот от 30 МГц до 3 ГГц,

рекомендует,

- 1 что информацию и методы, приведенные в Приложении 1, следует принимать для оценки характеристик распространения наружных систем радиосвязи малого радиуса действия в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц, где они применимы.

Приложение 1

1 Введение

На распространение радиоволн на трассах длиной меньше 1 км главным образом влияют здания и деревья, а не изменения отметок высоты. При этом преобладает влияние зданий, поскольку большинство радиолиний с короткой трассой находятся в городских и пригородных зонах. Вероятнее всего подвижный терминал находится в руках пешехода или установлен в автомобиле.

В настоящей Рекомендации определяются классы коротких трасс распространения и приводятся методы оценки потерь на трассе, разброса задержки и разброса по углу на этих трассах.

2 Физические рабочие среды и определение типов сот

Описываемые в настоящей Рекомендации среды классифицируются только с точки зрения распространения радиоволн. Среда, т. е. конструкция и высота зданий, использование подвижных терминалов (для пешеходов/автомобильных) и положение антенн, оказывает влияние на распространение радиоволн. Выделяют четыре различные среды, которые считаются наиболее типичными. Например, не рассматриваются холмистые районы, поскольку они менее типичны в крупных городах. Этих четыре среды перечислены в таблице 1. Признавая широкое разнообразие сред внутри каждого класса, не ставится целью смоделировать все возможные случаи; предполагается дать только модели распространения, характерные для наиболее часто встречающихся сред.

ТАБЛИЦА 1

Физические рабочие среды – ухудшение распространения радиоволн

Среда	Описание и рассматриваемые ухудшения распространения радиоволн
Городская зона высотной застройки	<ul style="list-style-type: none"> – Самый оживленный глубокий городской каньон, характеризующийся улицами, вдоль которых плотно стоят здания в несколько десятков этажей, что образует глубокий городской каньон – Высокие плотно стоящие здания и небоскребы чередуются друг с другом, что создает условия для многообразного распространения путем рассеяния в отсутствие прямой видимости (NLoS) – Ряды высоких зданий создают возможность очень больших задержек на трассе – Движущиеся плотным потоком транспортные средства и большие потоки людей в зоне действуют как отражатели, добавляя доплеровский сдвиг в отраженные волны – Деревья вдоль улиц обеспечивают динамическое экранирование
Городская зона многоэтажной застройки	<ul style="list-style-type: none"> – Городской каньон, характеризующийся улицами, вдоль которых стоят высокие многоэтажные здания – Большая высота зданий делает маловероятными существенные вклады от распространения волн над крышами – Ряды высоких зданий обеспечивают возможность больших задержек на трассе – Большое число движущихся транспортных средств в такой зоне играет роль отражателей, которые вносят доплеровский сдвиг в отраженные волны
Городская/пригородная зона малоэтажной застройки	<ul style="list-style-type: none"> – Типичны широкие улицы – Высота зданий в целом меньше трех этажей, что обуславливает вероятность дифракции над крышами – Иногда возможны отражение и затенение, вызываемые движущимся транспортом – Основными эффектами являются длительные задержки и малые доплеровские сдвиги

ТАБЛИЦА 1 (окончание)

Среда	Описание и рассматриваемые ухудшения распространения радиоволн
Жилая зона	<ul style="list-style-type: none"> – Одноэтажные и двухэтажные жилые дома – Дороги обычно двухрядные с припаркованными по обочинам автомобилями – Возможна густая или редкая листва – Движение автотранспорта обычно неинтенсивное
Сельская зона	<ul style="list-style-type: none"> – Небольшие здания, окруженные большими садами – Влияние высоты рельефа местности (топография) – Возможна густая или редкая листва – Движение автотранспорта иногда интенсивное

Для каждой из четырех различных сред в отношении подвижных терминалов рассматриваются два возможных сценария. Поэтому их пользователи подразделяются на пользователей-пешеходов и пользователей, едущих в автомобилях. Для этих двух приложений различается скорость перемещения подвижных терминалов, что приводит к весьма различным доплеровским сдвигам. В таблице 2 показаны типичные скорости для этих сценариев.

ТАБЛИЦА 2

Физические рабочие среды – типичная скорость перемещения подвижных терминалов

Среда	Скорость пользователей-пешеходов (м/с)	Скорость пользователей, едущих в автомобиле
Городская зона многоэтажной застройки	1,5	Типичная скорость движения в центре города составляет около 50 км/ч (14 м/с)
Городская/пригородная зона	1,5	Около 50 км/ч (14 м/с) На скоростной дороге – до 100 км/ч (28 м/с)
Жилая зона	1,5	Около 40 км/ч (11 м/с)
Сельская зона	1,5	80–100 км/ч (22–28 м/с)

Преобладающий тип механизма распространения радиоволн зависит также от высоты антенны базовой станции относительно окружающих зданий. В таблице 3 приведен список характерных типов сот (ячеек) для распространения радиоволн на коротких трассах вне зданий.

ТАБЛИЦА 3

Определение типов сот

Тип соты	Радиус соты	Типовое положение антенны базовой станции
Микросота	От 0,05 до 1 км	Вне здания; устанавливается выше среднего уровня крыш, высота некоторых окружающих зданий может превышать высоту антенны базовой станции
Микросота городской зоны плотной застройки	От 0,05 до 0,5 км	Вне здания; устанавливается ниже среднего уровня крыш
Пикосота	До 50 м	Внутри или вне здания (устанавливается ниже среднего уровня крыш)

(Обратите внимание на то, что "микросота городской зоны плотной застройки" прямо не определена в Рекомендации 5-й Исследовательской комиссии по радиосвязи.)

3 Классы трасс

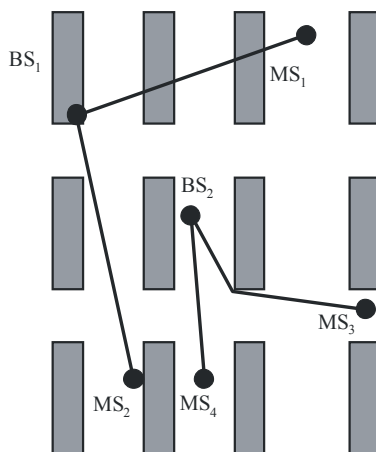
3.1 Определение ситуаций распространения радиоволн

На рисунке 1 показаны четыре варианта геометрии базовой станции (BS) и подвижной станции (MS). Базовая станция BS_1 установлена выше уровня крыш. Соответствующая сота представляет собой микросоту. Распространение радиоволн от этой базовой станции происходит главным образом поверх крыш. Базовая станция BS_2 установлена ниже уровня крыш; она определяет микросотовую среду городской зоны плотной застройки или пикосотовую среду. В сотах этого типа радиоволны распространяются главным образом по уличным каньонам. Для линий связи между подвижными терминалами можно предположить, что оба конца линии находятся ниже уровня крыш, и можно использовать модели, относящиеся к BS_2 .

3.1.1 Распространение радиоволн над крышами вне прямой видимости (NLoS)

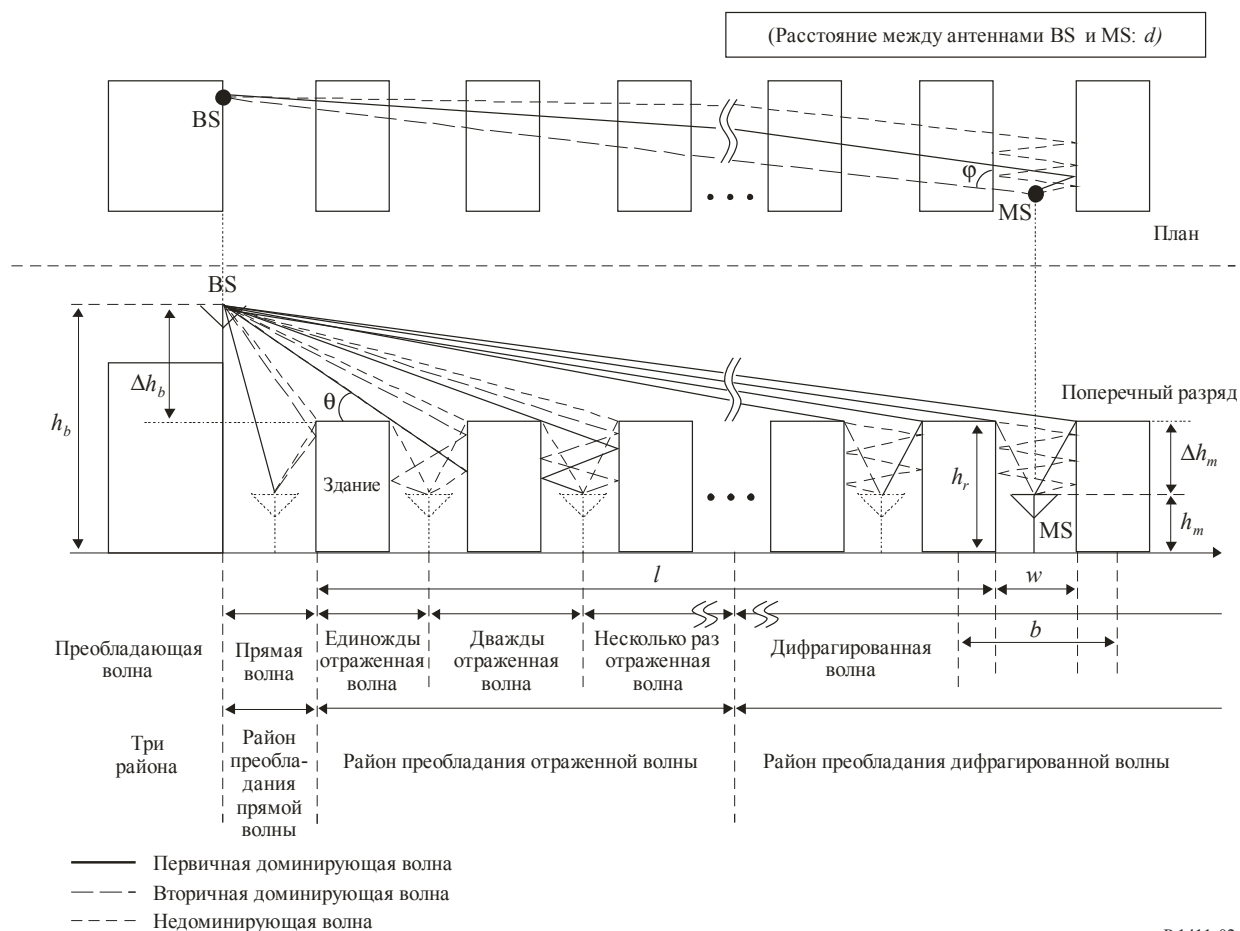
Типичный случай NLoS (линия BS_1 – MS_1 на рисунке 1) показан на рисунке 2. Ниже этот случай называется NLoS1.

РИСУНОК 1
Типичная ситуация распространения в городских зонах



P.1411-01

РИСУНОК 2
Определение параметров для случая NLoS1



P.1411-02

Соответствующие параметры для этой ситуации:

h_r : средняя высота зданий (м);

w : ширина улицы (м);

b : среднее расстояние между зданиями (м);

φ : ориентация улицы относительно прямой трассы (градусы);

h_b : высота антенны BS (м);

h_m : высота антенны MS (м);

l : длина участка трассы, занимаемого зданиями (м);

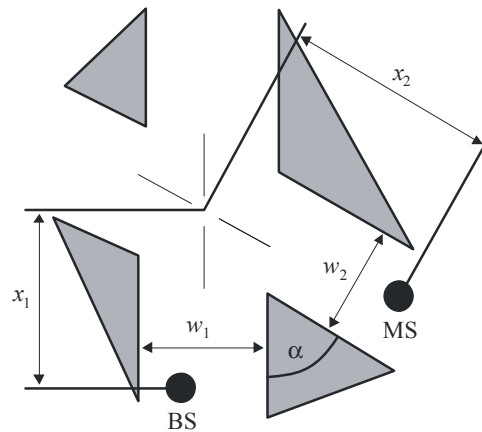
d : расстояние от BS до MS.

Случай NLoS1 часто встречается в жилых/сельских зонах для всех типов сот и преобладает в микросотах в городских/пригородных зонах малоэтажной застройки. Параметры h_r , b и l можно получить из данных о зданиях, расположенных на линии между антеннами. Однако определение w и φ требует двумерного анализа зоны вокруг подвижного терминала. Следует отметить, что l – это не обязательно нормаль по отношению к ориентации здания.

3.1.2 Распространение радиоволн по уличным каньонам, NLoS

На рисунке 3 показана ситуация для типичного случая NLoS микросоты городской зоны плотной застройки (линия BS₂–MS₃ на рисунке 1). Ниже этот случай называется NLoS2.

РИСУНОК 3
Определение параметров для случая NLoS2



P.1411-03

Соответствующие параметры для этой ситуации:

- w_1 : ширина улицы в точке расположения BS (м);
- w_2 : ширина улицы в точке расположения MS (м);
- x_1 : расстояние от BS до перекрестка (м);
- x_2 : расстояние от MS до перекрестка (м);
- α : угол перекрестка (рад).

NLoS2 – это преобладающий тип трассы в городских зонах многоэтажной застройки для всех типов сот и часто встречается в микросотах городской зоны плотной застройки и пикосотах в городских зонах малоэтажной застройки. Определение всех параметров для случая NLoS2 требует двумерного анализа зоны вокруг подвижного терминала.

3.1.3 Трассы прямой видимости (LoS)

Трассы BS₁–MS₂ и BS₂–MS₄ на рисунке 1 являются примерами ситуаций LoS. Одни и те же модели могут применяться для обоих типов трассы LoS.

3.2 Требования к данным

Для зависящих от местоположения расчетов в городских зонах можно использовать данные различных типов. Самая точная информация может быть получена из данных с высоким разрешением, которые включают:

- информацию о конструкции зданий;
- информацию об относительной и абсолютной высоте зданий;
- информацию о растительности.

Данные могут быть как в растровом, так и в векторном формате. Точность местоположения для векторных данных должна быть порядка 1–2 м. Рекомендованная разрешающая способность растровых данных составляет 1–10 м. Точность высоты для обоих форматов данных должна быть порядка 1–2 м.

Если не доступны данные с высоким разрешением, то рекомендуется использовать данные с низким разрешением (разрешение 50 м), предназначенные для описания использования земли. В зависимости от определения классов использования земли (городская зона плотной застройки, городская, пригородная и т. д.) могут быть присвоены параметры, требуемые для этих классов использования земли. Эти данные могут использоваться вместе с векторной информацией об улицах для получения углов ориентации улиц.

4 Модели потерь на трассе

Для типичных сценариев в городских зонах можно применить некоторые алгоритмы замкнутой формы. Эти модели распространения радиоволн могут использоваться как для зависящих от местоположения, так и для общих для всех местоположений расчетов. Соответствующие ситуации распространения радиоволн определены в пункте 3.1. Тип модели зависит также от диапазона частот. Для распространения в диапазоне УВЧ и для распространения в диапазоне миллиметровых волн необходимо использовать разные модели. В диапазоне УВЧ рассматриваются ситуации LoS и NLoS. При распространении в диапазоне миллиметровых волн рассматривается только случай LoS. В этом диапазоне частот необходимо учитывать дополнительное ослабление, вызываемое поглощением кислородом и гидрометеорами.

4.1 Ситуации LoS в уличных каньонах

Распространение в диапазоне УВЧ

В диапазоне частот УВЧ основные потери при передаче, как определено в Рекомендации МСЭ-R P.341, могут быть охарактеризованы двумя наклонами и одной точкой прерывания. Приблизительный нижний предел определяется следующим образом:

$$L_{LoS,l} = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{для } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{для } d > R_{bp} \end{cases}, \quad (1)$$

где R_{bp} – расстояние от точки прерывания и определяется как:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – длина волны (м). Нижний предел определяется на основе двулучевой модели отражения от поверхности земли.

Приблизительный верхний предел определяется как:

$$L_{LoS,u} = L_{bp} + 20 + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{для } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{для } d > R_{bp} \end{cases}. \quad (3)$$

L_{bp} – значение основных потерь при передаче в точке прерывания, определяемое как:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m} \right) \right|. \quad (4)$$

Для верхнего предела имеется запас на замирание 20 дБ. В уравнении (3) коэффициент ослабления до точки прерывания принимается равным 2,5, потому что короткое расстояние приводит к слабому влиянию затенения.

В соответствии с кривой потерь в свободном пространстве медианное значение определяется как:

$$L_{LoS,m} = L_{bp} + 6 + \begin{cases} 20 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{для } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{для } d > R_{bp} \end{cases} \quad (5)$$

Распространение в диапазоне частот СВЧ до 15 ГГц

В диапазоне СВЧ при длине трассы приблизительно до 1 км дорожное движение будет оказывать влияние на эффективную высоту дороги и, следовательно, на расстояние до точки прерывания. Это расстояние, R_{bp} , рассчитывается по формуле:

$$R_{bp} = 4 \frac{(h_b - h_s)(h_m - h_s)}{\lambda}, \quad (6)$$

где h_s – эффективная высота дороги из-за влияния таких объектов, как транспортные средства на дороге и пешеходы рядом с проезжей частью дороги. Следовательно, h_s зависит от трафика на дороге. Значения h_s , приведенные в таблицах 4 и 5, получены на основе измерений в дневное и ночное время и отражают условия интенсивного и неинтенсивного движения соответственно. При интенсивном движении транспортные средства занимали 10–20% площади проезжей части, а пешеходы 0,2–1% площади тротуара. При неинтенсивном движении было занято 0,1–0,5% площади проезжей части и менее 0,001% площади тротуара. Ширина дороги составляла 27 м, включая тротуары шириной 6 м с обеих сторон.

ТАБЛИЦА 4

Эффективная высота дороги, h_s (интенсивный трафик)

Частота (ГГц)	h_b (м)	h_s (м)	
		$h_m = 2,7$	$h_m = 1,6$
3,35	4	1,3	(2)
	8	1,6	(2)
8,45	4	1,6	(2)
	8	1,6	(2)
15,75	4	1,4	(2)
	8	(1)	(2)

(1) Расстояние до точки прерывания превышает 1 км.

(2) Точка прерывания не существует.

ТАБЛИЦА 5

Эффективная высота дороги, h_s (неинтенсивный трафик)

Частота (ГГц)	h_b (м)	h_s (м)	
		$h_m = 2,7$	$h_m = 1,6$
3,35	4	0,59	0,23
	8	(1)	(1)
8,45	4	(2)	0,43
	8	(2)	(1)
15,75	4	(2)	0,74
	8	(2)	(1)

(1) Измерения не производились.

(2) Расстояние до точки прерывания превышает 1 км.

Если $h_m > h_s$, то приближенные значения верхнего и нижнего пределов основных потерь при передаче для диапазона СВЧ можно рассчитать, используя уравнения (1) и (3), где L_{bp} задается как:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left\{ \frac{\lambda^2}{8\pi(h_b - h_s)(h_m - h_s)} \right\} \right|. \quad (7)$$

С другой стороны, когда $h_m \leq h_s$, точка прерывания отсутствует. В зоне около станции BS ($d < R_s$) основные потери при распространении аналогичны основным потерям при распространении в диапазоне УВЧ, однако зона, удаленная от BS, имеет характеристики распространения, в которых коэффициент ослабления имеет кубическую зависимость. Поэтому приближительный нижний предел при $d \geq R_s$ задается как:

$$L_{LoS,l} = L_s + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right). \quad (8)$$

Приближительный верхний предел при $d \geq R_s$ задается следующим образом:

$$L_{LoS,u} = L_s + 20 + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right). \quad (9)$$

Основные потери при распространении L_s определяются как:

$$L_s = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{2\pi R_s} \right) \right|. \quad (10)$$

Экспериментально установлено, что значение R_s в уравнениях (8)–(10) равно 20 м.

С учетом измерений медианное значение определяется как:

$$L_{LoS,m} = L_s + 6 + 30 \log_{10} \left(\frac{d}{R_s} \right). \quad (11)$$

Распространение в диапазоне миллиметровых волн

На частотах выше приблизительно 10 ГГц расстояние от точки прерывания R_{bp} в уравнении (2) намного превышает ожидаемый максимальный радиус соты (500 м). Это означает, что в этом диапазоне частот не ожидается действие закона четвертой степени. Поэтому скорость уменьшения мощности при увеличении расстояния будет почти точно соответствовать закону свободного пространства с показателем потерь на трассе приблизительно 2,2. Следует также учесть ослабление в атмосферных газах и дожде.

Ослабление в газах можно рассчитать из Рекомендации МСЭ-R P.676, а ослабление в дожде – из Рекомендации МСЭ-R P.530.

4.2 Модели для ситуаций NLoS

В случае NLoS сигналы могут достигать станции BS или MS с помощью механизмов дифракции или многолучевого распространения, которые могут представлять собой комбинацию механизмов дифракции и отражения. В этом пункте строятся модели, которые относятся к механизмам дифракции.

Распространение для городской зоны

Определены модели для двух ситуаций, описанных в пункте 3.1. Эти модели пригодны для:

h_b : 4–50 м;

h_m : 1–3 м;

f : 800–5000 МГц;
2–16 ГГц для $h_b < h_r$ и $w_2 < 10$ м (или тротуар);

d : 20–5000 м.

(Обратите внимание на то, что, хотя эта модель действительна до 5 км, настоящая Рекомендация предназначена для расстояний только до 1 км.)

Распространение радиоволн для пригородной зоны

Определена модель для ситуации $h_b > h_r$, описанной в пункте 3.1. Эта модель пригодна для:

h_r : любой высоты в м;

Δh_b : 1–100 м;

Δh_m : 4–10 (меньше, чем h_r) м;

h_b : $h_r + \Delta h_b$ м;

h_m : $h_r - \Delta h_m$ м;

f : 0,8–20 ГГц;

w : 10–25 м;

d : 10–5000 м.

(Обратите внимание на то, что, хотя эта модель действительна до 5 км, настоящая Рекомендация предназначена для расстояний только до 1 км.)

Распространение в диапазоне миллиметровых волн

Покрывание сигналом миллиметрового диапазона волн рассматривается только для ситуаций LoS из-за больших дифракционных потерь, испытываемых, когда препятствия превращают трассу распространения в NLoS. Для ситуаций NLoS многолучевые отражения и рассеяние становятся наиболее вероятным методом распространения сигнала.

4.2.1 Распространение поверх крыш для городской зоны

Приведенная ниже модель дифракции на большом числе экранов пригодна, если все крыши имеют одинаковую высоту. Если предположить, что высота крыш вдоль трассы распространения l различается лишь на величину меньше радиуса первой зоны Френеля (рисунок 2), высота крыш, используемая в этой модели, – это средняя высота крыш. Если разница высоты крыш намного превышает радиус первой зоны Френеля, то предпочтительный метод заключается в использовании вместо многоэкранной модели самых высоких зданий вдоль трассы для расчета дифракции у острого края (на остроконечном препятствии), как описано в Рекомендации МСЭ-R P.526.

В модели потерь при передаче в случае NLoS1 (см. рисунок 2) для крыш одинаковой высоты потери между изотропными антеннами выражаются как сумма потерь в свободном пространстве L_{bf} , дифракционных потерь на пути от крыши до улицы L_{rts} и ослабления из-за дифракции на большом числе экранов при прохождении мимо рядов зданий L_{msd} .

В этой модели L_{bf} и L_{rts} не зависят от высоты антенны станции BS, а L_{msd} зависит от того, расположена ли антенна BS ниже или выше высоты зданий.

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{для } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{для } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}. \quad (12)$$

Потери в свободном пространстве определяются по формуле:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log_{10} (d / 1\,000) + 20 \log_{10} (f), \quad (13)$$

где:

d : длина трассы (м);

f : частота (МГц).

Член уравнения L_{rts} описывает взаимодействие волны, распространяющейся по трассе с большим числом экранов на улице, где находится подвижная станция. Он учитывает ширину улицы и ее ориентацию.

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log_{10} (w) + 10 \log_{10} (f) + 20 \log_{10} (\Delta h_m) + L_{ori}, \quad (14)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{для } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{для } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & \text{для } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (15)$$

где:

$$\Delta h_m = h_r - h_m. \quad (16)$$

L_{ori} – это поправочный коэффициент на ориентацию улицы, который учитывает влияние дифракции на пути "крыша–улица" на улицы, которые не перпендикулярны направлению распространения волны (см. рисунок 2).

Дифракционные потери на большом количестве экранов на пути от станции BS из-за распространения мимо рядов зданий зависят от высоты антенны BS относительно высоты зданий и от угла падения. Критерий скользящего падения – это "расстояние установившегося поля", d_s :

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_b^2}, \quad (17)$$

где (см. рисунок 2):

$$\Delta h_b = h_b - h_r. \quad (18)$$

Для расчета L_{msd} расстояние d_s сравнивается с расстоянием l , которое занимают здания. Для расчета L_{msd} используется следующая процедура для устранения любого разрыва между различными используемыми моделями в случаях, когда длина зданий больше или меньше "расстояния установившегося поля".

Общие потери согласно модели дифракции на большом числе экранов определяются по формуле:

$$L_{msd} = \begin{cases} -\tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi}\right) \cdot (L1_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{для } l > d_s \text{ и } dh_{bp} > 0 \\ \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi}\right) \cdot (L2_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{для } l \leq d_s \text{ и } dh_{bp} > 0 \\ L2_{msd}(d) & \text{для } dh_{bp} = 0, \\ L1_{msd}(d) - \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta}\right) \cdot (L_{upp} - L_{mid}) - L_{upp} + L_{mid} & \text{для } l > d_s \text{ и } dh_{bp} < 0 \\ L2_{msd}(d) + \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta}\right) \cdot (L_{mid} - L_{low}) + L_{mid} - L_{low} & \text{для } l \leq d_s \text{ и } dh_{bp} < 0 \end{cases} \quad (19)$$

где:

$$dh_{bp} = L_{upp} - L_{low}; \quad (20)$$

$$\zeta = (L_{upp} - L_{low}) \cdot v; \quad (21)$$

$$L_{mid} = \frac{(L_{upp} + L_{low})}{2}; \quad (22)$$

$$L_{upp} = L1_{msd}(d_{bp}); \quad (23)$$

$$L_{low} = L2_{msd}(d_{bp}) \quad (24)$$

и

$$d_{bp} = |\Delta h_b| \sqrt{\frac{l}{\lambda}}; \quad (25)$$

$$v = [0,0417];$$

$$\chi = [0,1],$$

где отдельные потери согласно данной модели, $L1_{msd}(d)$ и $L2_{msd}(d)$, определяются следующим образом:

Расчет $L1_{msd}$ для случая $l > d_s$

(Обратите внимание на то, что это вычисление становится более точным, когда $l \gg d_s$.)

$$L1_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d / 1000) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b), \quad (26)$$

где:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{для } h_b > h_r \\ 0 & \text{для } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (27)$$

является показателем потерь, который зависит от высоты BS:

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{для } h_b > h_r \text{ и } f > 2000 \text{ МГц} \\ 73 - 0,8\Delta h_b & \text{для } h_b \leq h_r, f > 2000 \text{ МГц и } d \geq 500 \text{ м} \\ 73 - 1,6\Delta h_b d / 1000 & \text{для } h_b \leq h_r, f > 2000 \text{ МГц и } d < 500 \text{ м} \\ 54 & \text{для } h_b > h_r \text{ и } f \leq 2000 \text{ МГц} \\ 54 - 0,8\Delta h_b & \text{для } h_b \leq h_r, f \leq 2000 \text{ МГц и } d \geq 500 \text{ м} \\ 54 - 1,6\Delta h_b d / 1000 & \text{для } h_b \leq h_r, f \leq 2000 \text{ МГц и } d < 500 \text{ м} \end{cases} \quad (28)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{для } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} & \text{для } h_b \leq h_r \end{cases} \quad (29)$$

$$k_f = \begin{cases} -8 & \text{для } f > 2000 \text{ МГц} \\ -4 + 0,7(f / 925 - 1) & \text{для города средних размеров, а также пригорода} \\ & \text{центры со средней плотностью деревьев и } f \leq 2000 \text{ МГц} \\ -4 + 1,5(f / 925 - 1) & \text{для центральной зоны городской агломерации и } f \leq 2000 \text{ МГц} \end{cases} \quad (30)$$

Расчет $L2_{msd}$ для случая $l < d_s$

В этом случае следует провести дальнейшее различие согласно относительным высотам станции BS и крыш:

$$L2_{msd}(d) = -10 \log_{10}(Q_M^2), \quad (31)$$

где:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left(\frac{\Delta h_b}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{для } h_b > h_r + \delta h_u \\ \frac{b}{d} & \text{для } h_b \leq h_r + \delta h_u \text{ и } h_b \geq h_r + \delta h_l \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) & \text{для } h_b < h_r + \delta h_l \end{cases} \quad (32)$$

и

$$\theta = \arctan \left(\frac{\Delta h_b}{b} \right); \quad (33)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_b^2 + b^2} \quad (34)$$

и

$$\delta h_u = 10^{-\log_{10} \left(\sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right) - \frac{\log_{10}(d)}{9} + \frac{10}{9} \log_{10} \left(\frac{b}{2,35} \right)}; \quad (35)$$

$$\delta h_l = \frac{0,00023b^2 - 0,1827b - 9,4978}{(\log_{10}(f))^{2,938}} + 0,000781b + 0,06923. \quad (36)$$

4.2.2 Распространение поверх крыш для пригородной зоны

Модель распространения радиоволн для случая NLoS1, основанная на геометрической оптике (GO), представлена на рисунке 2. На этом рисунке показано, что состав входящих волн на MS изменяется в зависимости от расстояния между BS и MS. Прямая волна может достичь MS только в том случае, если расстояние между BS и MS очень короткое. Отраженные несколько раз (один, два или три раза) волны, имеющие относительно высокий уровень мощности, могут достичь MS в том случае, если расстояние между BS и MS относительно небольшое. Если же расстояние между BS и MS большое, то волны, отраженные несколько раз, не могут достичь станции и только многократно отраженные волны, имеющие низкий уровень мощности, по сравнению с уровнем мощности дифрагированных волн от крыш зданий, достигают MS. Исходя из этих механизмов распространения радиоволн, потери из-за расстояния между изотропными антеннами можно подразделить по трем районам с точки зрения преобладающих волн, поступающих на MS. Это районы преобладания прямых волн, отраженных волн и дифрагированных волн. Потери в каждом районе, основанные на GO, выражаются следующим образом.

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) & \text{для } d < d_0 & \text{(Район преобладания прямых волн)} \\ L_{0n} & \text{для } d_0 \leq d < d_{RD} & \text{(Район преобладания отраженных волн)} \\ 32,1 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_{RD}} \right) + L_{d_{RD}} & \text{для } d \geq d_{RD} & \text{(Район преобладания дифрагированных волн)} \end{cases}, \quad (37)$$

где:

$$L_{0n} = \begin{cases} L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d - d_k), & \text{когда } d_k \leq d < d_{k+1} < d_{RD} \\ & (k = 0, 1, 2 \dots) \\ L_{d_k} + \frac{L_{d_{RD}} - L_{d_k}}{d_{RD} - d_k} \cdot (d - d_k), & \text{когда } d_k \leq d < d_{RD} < d_{k+1} \end{cases}; \quad (38)$$

$$d_k = \frac{1}{\sin \varphi} \cdot \sqrt{B_k^2 + (h_b - h_m)^2}; \quad (39)$$

$$L_{d_k} = 20 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{4\pi d_{kp}}{0,4^k \cdot \lambda} \right\}; \quad (40)$$

$$d_{RD}(f) = 0,625 \cdot (d_3 - d_1) \cdot \log_{10}(f) + 0,44 \cdot d_1 + 0,5 \cdot d_2 + 0,06 \cdot d_3 \quad (41)$$

(0,8 ГГц ≤ f ≤ 20 ГГц);

$$L_{d_{RD}} = L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d_{RD} - d_k) \quad (d_k \leq d_{RD} \leq d_{k+1}); \quad (42)$$

$$d_{kp} = \frac{1}{\sin \varphi_k} \cdot \sqrt{A_k^2 + (h_b - h_m)^2}; \quad (43)$$

$$A_k = \frac{w \cdot (h_b - h_m) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - h_m)}; \quad (44)$$

$$B_k = \frac{w \cdot (h_b - h_m) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - h_m)} - k \cdot w; \quad (45)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{B_k}{A_k} \cdot \tan \varphi \right). \quad (46)$$

4.2.3 Распространение радиоволн в уличных каньонах для диапазона частот 800–2000 МГц

Для ситуаций NLoS2, когда обе антенны находятся ниже уровня крыш, необходимо учитывать дифрагированные и отраженные волны в углах перекрестков улиц (см. рисунок 3).

$$L_{NLoS2} = -10 \log_{10} \left(10^{-L_r/10} + 10^{-L_d/10} \right) \quad \text{дБ}, \quad (47)$$

где:

L_r : потери на отражение на трассе, определяемые как:

$$L_r = 20 \log_{10} (x_1 + x_2) + x_1 x_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{дБ}, \quad (48)$$

где:

$$f(\alpha) = \frac{3,86}{\alpha^{3,5}} \quad \text{дБ}, \quad (49)$$

где $0,6 < \alpha$ [рад] $< \pi$.

L_d : дифракционные потери на трассе, определяемые следующим образом:

$$L_d = 10 \log_{10} [x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + 2D_a - 0,1 \left(90 - \alpha \frac{180}{\pi} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{дБ}. \quad (50)$$

$$D_a = \left(\frac{40}{2\pi} \right) \left[\arctan \left(\frac{x_2}{w_2} \right) + \arctan \left(\frac{x_1}{w_1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad \text{дБ.} \quad (51)$$

4.2.4 Распространение радиоволн в уличных каньонах для диапазона частот от 2 до 16 ГГц

Модель распространения радиоволн для ситуаций NLoS2, описанных в пункте 3.1.2 с углом перекрестка $\alpha = \pi/2$ рад, получена на основе измерений в диапазоне частот от 2 до 16 ГГц, где $h_b < h_r$, а w_2 не превышает 10 м (или тротуар). Характеристики потерь на трассе можно подразделить на две части: район потерь в углах и район NLoS. Район потерь в углах простирается для d_{corner} от точки, расположенной на расстоянии 1 м вниз от края улицы LoS в направлении улицы NLoS, в которую он вливается. Потери в углах (L_{corner}) выражаются как дополнительное затухание на расстоянии d_{corner} . Район NLoS лежит за пределами района потерь в углах, где применяется параметр коэффициента (β). Это показано на примере типичной кривой, представленной на рисунке 4. Используя x_1 , x_2 и w_1 , как показано на рисунке 3, определяем общие потери на трассе (L_{NLoS2}) за пределами района с углами ($x_2 > w_1/2 + 1$) с помощью уравнений:

$$L_{NLoS2} = L_{LoS} + L_c + L_{att}; \quad (52)$$

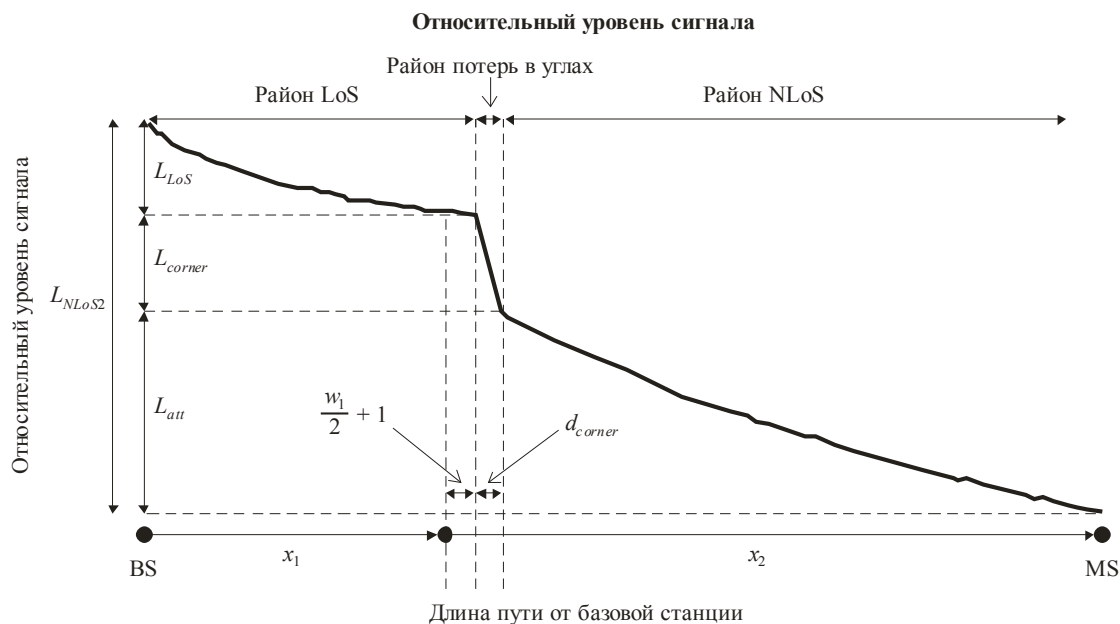
$$L_c = \begin{cases} \frac{L_{corner}}{\log_{10}(1 + d_{corner})} \log_{10}(x_2 - w_1/2) & w_1/2 + 1 < x_2 \leq w_1/2 + 1 + d_{corner} ; \\ L_{corner} & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{corner} \end{cases} \quad (53)$$

$$L_{att} = \begin{cases} 10\beta \log_{10} \left(\frac{x_1 + x_2}{x_1 + w_1/2 + d_{corner}} \right) & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{corner} , \\ 0 & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{corner} \end{cases} \quad (54)$$

где L_{LoS} – потери на трассе в улице LoS для $x_1 (> 20$ м), в соответствии с расчетами, приведенными в пункте 4.1. В уравнении (53) значение L_{corner} приведено на уровне 20 дБ в городской зоне и 30 дБ – в жилой зоне. В уравнении (54) значение β задано шестью, а значение d_{corner} равно 30 м в обеих средах.

РИСУНОК 4

Типичная тенденция распространения радиоволн вдоль уличных каньонов при небольшой высоте базовой станции для диапазона частот от 2 до 16 ГГц



В жилой зоне потери на трассе не возрастают монотонно с увеличением расстояния, и поэтому данный параметр коэффициента может быть ниже его соответствующего значения в городской зоне из-за наличия переулков и разрывов между домами.

При наличии высокой антенны базовой станции в небольшой макросоте эффект дифракции над крышами более значительный. Таким образом, характеристики распространения радиоволн не зависят от потерь в углах.

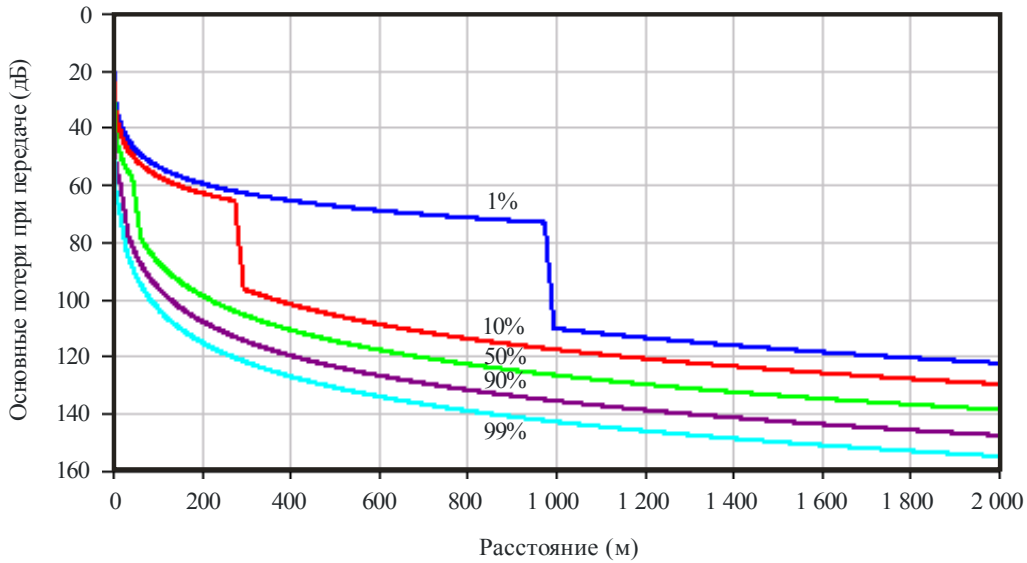
4.3 Распространение радиоволн между терминалами, расположенными ниже уровня крыш, в диапазоне УВЧ

Модель, описываемая ниже, предназначена для расчета основных потерь при передаче между двумя терминалами небольшой высоты в городских зонах. Она включает как районы линии прямой видимости (LoS), так и районы линии не прямой видимости (NLoS) и моделирует быстрый рост уровня сигналов, зафиксированный в углу между районами LoS и NLoS. Эта модель включает статистические данные изменчивости в зависимости от места в районах LoS и NLoS и предлагает статистическую модель для углового расстояния между районами LoS и NLoS. На рисунке 5 наглядно представлены районы LoS, NLoS, район с углами, а также статистическая изменчивость, спрогнозированная с использованием данной модели.

Эта модель рекомендуется для распространения радиоволн между невысокими терминалами в случаях, когда высота антенн обоих терминалов находится приблизительно на уровне улицы, т. е. значительно ниже высоты крыш, и иным образом не определена. Она эквивалентна как в отношении передатчика, так и приемника и действительна для частот в диапазоне 300–3000 МГц. Эта модель основывается на измерениях, произведенных в диапазоне УВЧ при высоте антенн от 1,9 до 3,0 м над уровнем поверхности и расстояниях между передатчиком и приемником, не превышающих 3000 м.

РИСУНОК 5

Кривые основных потерь при передаче, не превышенных для 1, 10, 50, 90 и 99% мест
(частота = 400 МГц, пригородная зона)



Требуемыми параметрами являются частота f (МГц) и расстояние между терминалами d (м).

Шаг 1: Рассчитывается среднее значение потерь на линии прямой видимости:

$$L_{LoS}^{median}(d) = 32,45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10}(d/1000). \quad (55)$$

Шаг 2: Рассчитывается поправка на место нахождения LoS для необходимого процента мест, p (%):

$$\Delta L_{LoS}(p) = 1,5624\sigma \left(\sqrt{-2 \ln(1 - p/100)} - 1,1774 \right), \quad \text{где } \sigma = 7 \text{ дБ}. \quad (56)$$

Альтернативные значения поправки для LoS для $p = 1, 10, 50, 90$ и 99% приводятся в таблице 6.

Шаг 3: Поправка на место нахождения LoS добавляется к среднему значению потерь на LoS:

$$L_{LoS}(d, p) = L_{LoS}^{median}(d) + \Delta L_{LoS}(p). \quad (57)$$

Шаг 4: Рассчитывается среднее значение потерь на линии не прямой видимости:

$$L_{NLoS}^{median}(d) = 9,5 + 45 \log_{10} f + 40 \log_{10}(d/1000) + L_{urban}. \quad (58)$$

L_{urban} зависит от категории городской зоны и равняется 0 дБ для пригородной зоны, 6,8 дБ — для городской зоны и 2,3 дБ — для городской зоны плотной застройки/многоэтажной застройки.

Шаг 5: Добавляется поправка на место нахождения NLoS для необходимого процента мест, p (%):

$$\Delta L_{NLoS}(p) = \sigma N^{-1}(p/100), \quad \text{где } \sigma = 7 \text{ дБ}. \quad (59)$$

$N^{-1}(\cdot)$ — обратная функция нормального совокупного распределения. Приближенное представление данной функции, пригодное для p в интервале между 1 и 99%, описывается функцией изменчивости в зависимости от места $Q_i(x)$ Рекомендации МСЭ-R P.1546. Альтернативные значения поправки на место нахождения NLoS для $p = 1, 10, 50, 90$ и 99% приводятся в таблице 6.

ТАБЛИЦА 6

Таблица поправок изменчивости в зависимости от места LoS и NLoS

p (%)	ΔL_{LoS} (дБ)	ΔL_{NLoS} (дБ)	d_{LoS} (м)
1	-11,3	-16,3	976
10	-7,9	-9,0	276
50	0,0	0,0	44
90	10,6	9,0	16
99	20,3	16,3	10

Шаг 6: Поправка на место нахождения NLoS добавляется к среднему значению потерь на NLoS:

$$L_{NLoS}(d, p) = L_{NLoS}^{median}(d) + \Delta L_{NLoS}(p) \quad (60)$$

Шаг 7: Для необходимого процента мест p (%) рассчитывается расстояние d_{LoS} , для которого часть LoS F_{LoS} равна p :

$$\begin{aligned} d_{LoS}(p) &= 212[\log_{10}(p/100)]^2 - 64 \log_{10}(p/100), & \text{если } p < 45 \\ d_{LoS}(p) &= 79,2 - 70(p/100) & \text{в других случаях} \end{aligned} \quad (61)$$

Значения d_{LoS} для $p = 1, 10, 50, 90$ и 99% приводятся в таблице 6. Данная модель не проверялась для $p < 0,1\%$. Статистические данные были получены из двух городов в Соединенном Королевстве, и в других странах они могут быть различными. С другой стороны, если в том или ином конкретном случае угловое расстояние известно, то $d_{LoS}(p)$ выставляется на это расстояние.

Шаг 8: После этого потери на трассе на расстоянии d представляются как:

- Если $d < d_{LoS}$, то $L(d, p) = L_{LoS}(d, p)$.
- Если $d > d_{LoS} + w$, то $L(d, p) = L_{NLoS}(d, p)$.
- В противном случае проводится линейная интерполяция между значениями $L_{LoS}(d_{LoS}, p)$ и $L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p)$:

$$\begin{aligned} L_{LoS} &= L_{LoS}(d_{LoS}, p) \\ L_{NLoS} &= L_{NLoS}(d_{LoS} + w, p) \\ L(d, p) &= L_{LoS} + (L_{NLoS} - L_{LoS})(d - d_{LoS})/w \end{aligned}$$

Ширина w вводится для того, чтобы обеспечить переходный район между районами LoS и NLoS. Этот переходный район виден из соответствующих данных и типично имеет ширину $w = 20$ м.

4.4 Параметры по умолчанию для общих для всех местоположений расчетов

Если данные о конструкции зданий и дорог неизвестны (общая для всех местоположений ситуация), то рекомендуется использовать следующие значения по умолчанию:

$$h_r = 3 \times (\text{число этажей}) + \text{высота крыши (м)};$$

$$\begin{aligned} \text{высота крыши} &= 3 \text{ м для скатных крыш;} \\ &= 0 \text{ м для плоских крыш;} \\ w &= b/2; \\ b &= 20\text{--}50 \text{ м;} \\ \varphi &= 90^\circ. \end{aligned}$$

4.5 Влияние растительности

Эффекты распространения волн через растительность (главным образом через деревья) важны для прогнозирования коротких трасс вне зданий. Можно выявить два основных механизма распространения волн:

- распространение сквозь деревья (не вокруг них или над ними);
- распространение над деревьями.

Первый механизм преобладает для геометрии трасс, при которой обе антенны расположены ниже вершин деревьев, а расстояние распространения сквозь деревья невелико, в то время как второй механизм преобладает для геометрии трасс, при которой антенна находится выше вершин деревьев. На затухание сильно влияет многолучевое рассеяние, вызванное дифракцией энергии сигнала при прохождении как над деревьями, так и сквозь них. Для распространения сквозь деревья можно определить удельное затухание за счет растительности, используя Рекомендацию МСЭ-R P.833. В ситуациях, когда волны распространяются над деревьями, дифракция является основным видом распространения над краями деревьев, находящимися ближе всех к низкой антенне. Этот вид распространения проще всего смоделировать, используя идеальную модель дифракции у острого края (см. Рекомендацию МСЭ-R P.526), хотя такая модель может недооценивать напряженность поля, поскольку в ней не учитывается многократное рассеяние верхушками деревьев; этот механизм можно смоделировать с помощью теории распространения излучения.

5 Потери на входе в здание

Потери на входе в здание – это дополнительные потери из-за наличия стены здания (включая окна и другие элементы). Они определяются как разность между уровнями сигнала вне здания и внутри здания на одной и той же высоте. Необходимо также учитывать угол падения. (Если длина трассы меньше чем приблизительно 10 м, различие потерь в свободном пространстве из-за изменения длины пути для этих двух измерений должно учитываться при определении потерь на вход в здание. При нахождении антенн вблизи стены может также потребоваться учет эффектов поля в ближней зоне.) Дополнительные потери связаны с проникновением внутри здания; соответствующие рекомендации приведены в Рекомендации МСЭ-R P.1238. Полагают, что обычно преобладает вид распространения, при котором сигналы проникают в здание приблизительно горизонтально через поверхность стены (включая окна), и что для зданий с однородной конструкцией потери на входе в здание не зависят от высоты.

Потери на входе в здание следует учитывать при оценке зоны радиопокрытия наружной системы для терминала, находящегося внутри здания. Они также важны для учета проблем помех между системами вне и внутри зданий.

Результаты экспериментов, приведенные в таблице 7, были получены на частоте 5,2 ГГц при прохождении волны через внешнюю стену здания из кирпича и бетона со стеклянными окнами. Толщина стены составляла 60 см, а отношение площади окон к площади стены – приблизительно 2:1.

ТАБЛИЦА 7

Пример потерь на входе в здание

Частота	Жилое здание		Административное здание		Торговое здание	
	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
5,2 ГГц			12 дБ	5 дБ		

В таблице 8 приведены результаты измерений на частоте 5,2 ГГц при прохождении волны через внешнюю стену из каменных блоков при угле падения от 0° до 75°. Толщина стены составляла 400 мм, она состояла из двух слоев блоков толщиной 100 мм со свободной засыпкой между ними. Потери на прохождение через стену были чрезвычайно чувствительны к положению приемника, особенно при больших углах падения, о чем свидетельствует большое значение стандартного отклонения.

ТАБЛИЦА 8

Потери на прохождение через стену из каменных блоков при различных углах падения

Угол падения (градусы)	0	15	30	45	60	75
Потери на прохождение через стену (дБ)	28	32	32	38	45	50
Стандартное отклонение (дБ)	4	3	3	5	6	5

Дополнительная информация о потерях на входе в здание, предназначенная главным образом для спутниковых систем, содержится в Рекомендации МСЭ-R P.679 и может быть использована для оценки потерь на входе в здание для наземных систем.

6 Модели многолучевого распространения

Описание многолучевого распространения и определения терминов даны в Рекомендации МСЭ-R P.1407.

6.1 Модели многолучевого распространения для уличных каньонов

6.1.1 Случай ненаправленных антенн

Характеристики разброса задержки при многолучевом распространении в случае LoS и использования ненаправленной антенны в городской зоне многоэтажной застройки для микросот и пикосот (как определено в таблице 3) были разработаны на основе измеренных данных на частотах 2,5–15,75 ГГц при расстояниях от 50 до 400 м. Среднеквадратичный разброс задержки S на расстоянии d м подчиняется нормальному распределению со средним значением, определяемым по формуле:

$$a_s = C_a d^{\gamma_a} \quad \text{нс,} \quad (62)$$

и стандартным отклонением, определяемым по формуле:

$$\sigma_s = C_\sigma d^{\gamma_\sigma} \quad \text{нс,} \quad (63)$$

где коэффициенты C_a , γ_a , C_σ и γ_σ зависят от высоты антенны и среды распространения. В таблице 9 перечисляются некоторые типичные значения этих коэффициентов для расстояний 50–400 м, полученные на основе измерений в городских и жилых зонах.

ТАБЛИЦА 9

Типичные коэффициенты для характеристик зависимости среднеквадратичного разброса задержки от расстояния для случая ненаправленной антенны

Условия измерения				a_s		σ_s	
Зона	f (ГГц)	h_b (м)	h_m (м)	C_a	γ_a	C_σ	γ_σ
Городская ⁽¹⁾	0,781	5	5	1 254,3	0,06	102,2	0,04
Городская ⁽²⁾	2,5	6,0	3,0	55	0,27	12	0,32
	3,35–15,75	4,0	2,7	23	0,26	5,5	0,35
			1,6	10	0,51	6,1	0,39
3,35–8,45	0,5						
Жилая ⁽²⁾	3,35	4,0	2,7	2,1	0,53	0,54	0,77
	3,35–15,75		1,6	5,9	0,32	2,0	0,48

(1) Для расчета среднеквадратичного разброса задержки используется пороговое значение, равное 20 дБ.

(2) Для расчета среднеквадратичного разброса задержки используется пороговое значение, равное 30 дБ.

На основе данных измерений на частоте 2,5 ГГц была получена средняя зависимость профиля задержки, равная:

$$P(t) = P_0 + 50(e^{-t/\tau} - 1) \quad \text{дБ}, \quad (64)$$

где:

P_0 : пиковая мощность (дБ);

τ : коэффициент ослабления,

а t измеряется в нс.

На основе данных измерений для среднеквадратичного разброса задержки S значение τ можно рассчитать следующим образом:

$$\tau = 4S + 266 \quad \text{нс}. \quad (65)$$

Линейная зависимость между τ и S действительна только в случае LoS.

На основе того же набора данных измерений были получены также мгновенные свойства профиля задержки. Энергия, поступающая в первые 40 нс, имеет райсовское распределение с коэффициентом K , приблизительно равным 6–9 дБ, в то время как энергия, поступающая позднее, имеет рэлеевское или райсовское распределение с коэффициентом K до приблизительно 3 дБ. (Определения распределений вероятности приведены в Рекомендации МСЭ-R P.1057.)

6.1.2 Случай направленных антенн

В системах фиксированного беспроводного доступа и при связи между точками доступа систем беспроводных ячеистых сетей в качестве передающих и приемных антенн применяются направленные антенны. Типичный результат применения таких антенн приводится ниже. При использовании направленных антенн в качестве антенн передатчика и приемника приходящие задержанные волны подавляются диаграммой направленности антенны. Поэтому разброс задержки становится небольшим. Кроме того, принимаемая мощность увеличивается с повышением усиления антенны, если в качестве передающей и приемной антенн используется направленная антенна. Исходя из этого в беспроводных системах используются именно направленные антенны. Поэтому важно понимать влияние направленности антенны в моделях многолучевого распространения.

Характеристики разброса задержки при многолучевом распространении в случае LoS и использование направленной антенны в городской зоне многоэтажной застройки для микросот и пикосот городской зоны плотной застройки (как определено в таблице 3) были получены на основе данных измерений в полосе 5,2 ГГц на расстояниях от 10 до 500 м. Антенны были поставлены таким образом, что направление максимального усиления одной антенны совпадало с аналогичным направлением друг на друга со стороны другой антенны. В таблице 10 приведены уравнения для получения коэффициентов относительно ширины луча антенны по уровню половинной мощности для формулы (58) и расстояний 10–500 м на основе измерений в городской зоне. Эти уравнения зависят только от ширины луча антенны по уровню половинной мощности и действительны для любой ширины дороги.

ТАБЛИЦА 10

Типичные коэффициенты для характеристик зависимости среднеквадратичного разброса задержки от расстояния для случая направленной антенны

Условия измерения				a_s	
Зона	f (ГГц)	h_b (м)	h_m (м)	C_a	γ_a
Городская	5,2	3,5	3,5	$9,3 + 1,5\log(\theta)$	$3,3 \times 10^{-2} + 4,6\theta \times 10^{-2}$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Для расчета среднеквадратичного разброса задержки используется пороговое значение, равное 20 дБ.

Здесь θ представляет ширину луча антенны по уровню половинной мощности в радианах как для передающей, так и для приемной антенны. Необходимо отметить, что в случае использования в качестве передающей и приемной антенн ненаправленных антенн, θ следует установить в значение 2π .

6.2 Модели многолучевого распространения над крышами

Характеристики разброса задержки при многолучевом распространении для случаев LoS и NLoS в городской зоне многоэтажной застройки для микросот (как определено в таблице 3) были получены на основе измеренных данных на частотах 1920–1980 МГц, 2110–2170 МГц и 3650–3750 МГц при использовании ненаправленных антенн. Средний среднеквадратичный разброс задержки S в этой среде определяется по формуле:

$$S_u = \exp(A \cdot L + B) \quad \text{нс}, \quad (66)$$

где A и B – коэффициенты среднеквадратичного разброса задержки, а L – потери на трассе (дБ). В таблице 11 содержатся типичные значения этих коэффициентов для расстояний от 100 м до 1 км, основанные на измерениях, проведенных в городских зонах.

ТАБЛИЦА 11

Типичные коэффициенты для среднеквадратичного разброса задержки

Условия измерения			Коэффициенты среднеквадратичного разброса задержки	
Зона	Частота (ГГц)	Расстояние (м)	A	B
Городская	3 650–3 750 МГц	100–1 000	0,031	2,091
	1 920–1 980 МГц, 2 110–2 170 МГц	100–1 000	0,038	2,3

Распределения характеристик задержки при многолучевом распространении в диапазоне частот 3,7 ГГц в городской зоне при высоте каждой из BS антенн, равной 40 м и 60 м, и высоте антенны MS 2 м были получены на основе результатов измерений. Распределения характеристик задержки при многолучевом распространении в диапазонах частот 3,7 ГГц и 5,2 ГГц в пригородной зоне при высоте антенны BS 20 м и высоте антенны MS, равной 2,0 м и 2,8 м, были получены на основе результатов измерений. В таблице 12 приведены измеренные значения среднеквадратичного разброса задержки для диапазонов 3,7 ГГц и 5,2 ГГц для случаев, когда интегральная вероятность составляет 50% и 95%.

ТАБЛИЦА 12

Типичные значения среднеквадратичного разброса задержки*

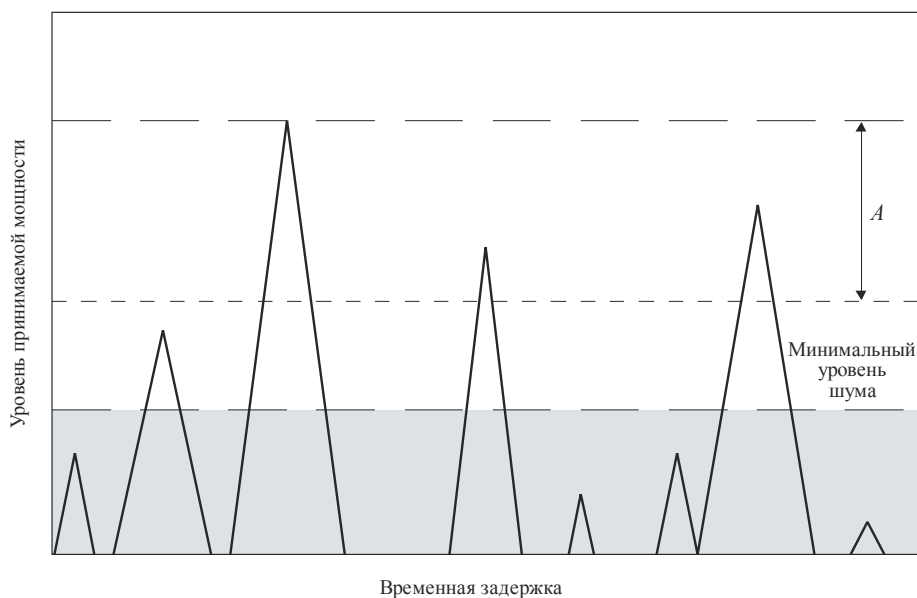
Условия измерения						Среднеквадратичный разброс задержки (нс)	
Зона	Сценарий	Частота (GHz)	Высота антенны		Диапазон (м)	50%	95%
			h_{BS} (м)	h_r (м)			
Городская зона высотной застройки	LoS	2,5	100	2	100–1 000	208	461
	NLoS					407	513
Городская		3,7	60	2	100–1 000	232	408
			40	2	100–1 000	121	357
Пригородная		3,7	20	2	100–1 000	125	542
		5,2	20	2,8	100–1 000	189	577

* При расчете среднеквадратичного разброса задержки использовалось пороговое значение, равное 30 дБ.

7 Количество компонентов сигнала

При проектировании высокоскоростных систем передачи данных с использованием методов разнесения за счет многолучевого распространения и синтеза важно оценить количество компонентов сигнала (т. е. доминирующий компонент плюс компоненты многолучевого распространения), которые поступают в приемник. Количество компонентов сигнала можно получить из профиля задержки в виде числа пиков, амплитуды которых отличаются от амплитуды самого высокого пика не более чем на A дБ и которые превышают минимальный уровень шума, как показано на рисунке 6.

РИСУНОК 6
Определение для подсчета числа пиков



P.1411-06

В таблице 13 приведены результаты для ряда компонентов сигнала, полученные на основании измерений в различных сценариях для различных высот антенн, сред и различных частот.

ТАБЛИЦА 13
Максимальное количество компонентов сигнала

Тип среды	Разрешение задержки времени	Частота (ГГц)	Высота антенны (м)		Диапазон (м)	Максимальное количество компонентов сигнала					
			h_b	h_m		3 дБ		5 дБ		10 дБ	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%
Городская зона	200 нс	1,9–2,1	46	1,7	100–1 600	1	2	1	2	2	4
Пригородная зона	175 нс	2,5	12	1	200–1 500	1	2	1	2	2	4
Городская зона	20 нс	3,35	4	1,6	0–200	2	3	2	4	5	6
					0–1 000	2	3	2	4	5	9
			55	2,7	150–590	2	2	2	3	3	13
Жилая зона	20 нс	3,35	4	2,7	0–480	2	2	2	2	2	3
Пригородная зона	175 нс	3,5	12	1	200–1 500	1	2	1	2	1	5
Пригородная зона	50 нс	3,67	40	2,7	0–5 000	1	2	1	3	3	5
Пригородная зона	100 нс	5,8	12	1	200–1 500	1	2	3	5	4	5
Городская зона	20 нс	8,45	4	1,6	0–200	1	3	2	3	4	6
					0–1 000	1	2	2	4	4	8
			55	2,7	150–590	2	2	2	3	3	12
Городская зона	20 нс	15,75	4	1,6	0–200	1	3	2	3	4	5
					0–1 000	2	3	2	4	6	10

Для измерений, описанных в пункте 6.2, в таблице 15 приводится интервал разностной задержки времени для 4 наиболее сильных компонентов относительно компонента, поступившего первым, а также их соответствующие амплитуды.

8 Характеристики поляризации

Избирательность по кроссполяризации (XPD), определенная в Рекомендации МСЭ-R P.310, различается в зонах LoS и NLoS в микросотовой среде в СВЧ диапазоне. Измерения дают медианное значение XPD 13 дБ для трасс LoS и 8 дБ – для трасс NLoS и стандартное отклонение 3 дБ для трасс LoS и 2 дБ – для трасс NLoS в диапазоне СВЧ. Эти медианные значения сопоставимы со значениями для УВЧ диапазона для открытых пространств и городских зон соответственно, приведенными в Рекомендации МСЭ-R P.1406.

ТАБЛИЦА 14

Тип среды	Антенна BS	Частота (ГГц)	Высота антенны (м)		Диапазон (м)	Максимальное количество компонентов					
			h_b	h_m		$A = 3$ дБ		$A = 5$ дБ		$A = 10$ дБ	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%
Городская зона	Низкая	3,35	4	1,6	0–200	2	3	2	4	5	6
					0–1 000	2	3	2	4	5	9
Городская зона	Низкая	8,45	4	1,6	0–200	1	3	2	3	4	6
					0–1 000	1	2	2	4	4	8
Городская зона	Низкая	15,75	4	1,6	0–200	1	3	2	3	4	5
					0–1 000	2	3	2	4	6	10
Городская зона	Высокая	3,35	55	2,7	150–590	2	2	2	3	3	13
		8,45	55	2,7	150–590	2	2	2	3	3	12
Жилая зона	Низкая	3,35	4	2,7	0–480	2	2	2	2	2	3
Пригородная зона	Высокая	3,67	40	2,7	0–5 000	1	2	1	3	3	5

ТАБЛИЦА 15

Интервал разностной задержки времени для 4 наиболее сильных компонентов относительно компонента, поступившего первым, а также их соответствующие амплитуды

Тип среды	Разрешение задержки времени	Частота (ГГц)	Высота антенны (м)		Диапазон (м)	Дополнительная задержка времени (мкс)							
			h_b	h_m		1-й		2-й		3-й		4-й	
						80%	95%	80%	95%	80%	95%	80%	95%
Городская зона	200 нс	1,9–2,1	46	1,7	100–1 600	0,5	1,43	1,1	1,98	1,74	2,93	2,35	3,26
Приведенная мощность относительно наиболее сильного компонента (дБ)						0	0	-7,3	-9	-8,5	-9,6	-9,1	-9,8

9 Характеристики направления прихода сигнала

Среднеквадратичный разброс по углу, как определено в Рекомендации МСЭ-R P.1407, в азимутальном направлении в микросоте или пикосоте в городской зоне был получен на основе результатов измерений, произведенных на частоте 8,45 ГГц. Приемная базовая станция имела параболическую антенну с шириной луча по уровню половинной мощности 4° .

Кроме того, были проведены измерения в городской зоне для микросот городской зоны плотной застройки. Вводимые коэффициенты разброса по углу основаны на измерениях в городских зонах для расстояний 10~1000 м в ситуациях LoS на частоте 0,781 ГГц. Для получения углового профиля используется четырехэлементная ненаправленная линейная матрица с методом формирования луча по Бартлетту.

Коэффициенты для среднеквадратичного разброса по углу были получены, как показано в таблице 16.

ТАБЛИЦА 16

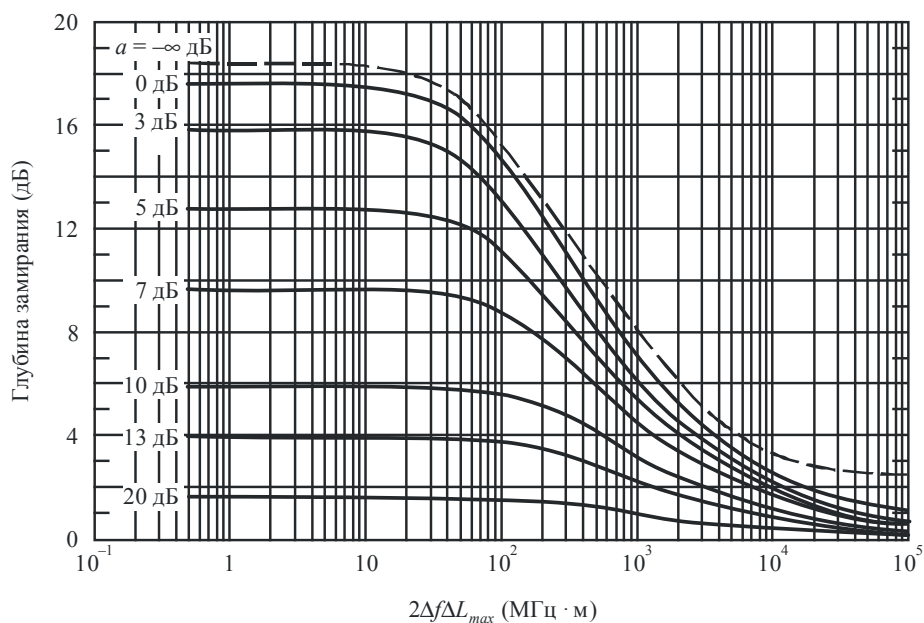
Типичные коэффициенты для характеристик зависимости среднеквадратичного разброса по углу от расстояния

Условия измерения				Среднее значение (градусы)	Стандартное отклонение (градусы)	Примечание
Зона	f (ГГц)	h_b (м)	h_m (м)			
Городская	0,781	5	1,5	28,15	13,98	LoS
Городская	8,45	2,7	4,4	30	11	LoS
Городская	8,45	2,7	4,4	41	18	NLoS

10 Характеристики замирания

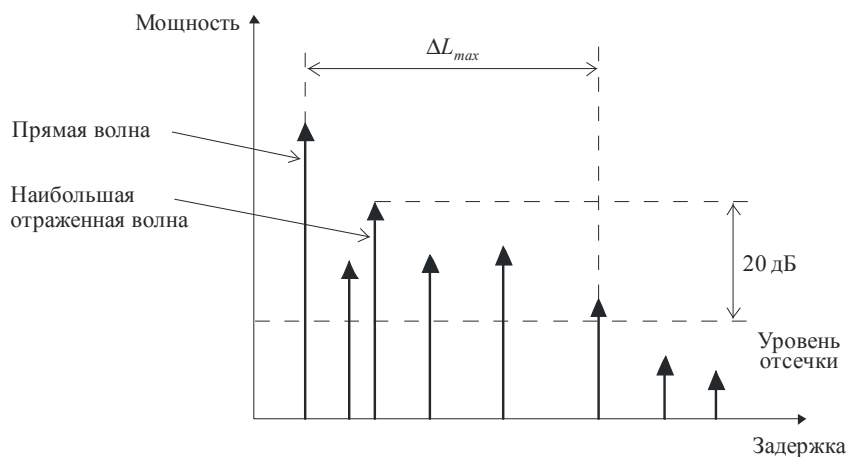
Глубина замирания, определяемая как разность между 50-процентным и 1-процентным значениями интегральной вероятности уровней полученных сигналов, выражается как функция произведения $(2\Delta f\Delta L_{max}$ МГц · м) ширины полосы пропускания приемника $2\Delta f$ (МГц) и максимальной разности длин трасс распространения ΔL_{max} (м), как показано на рисунке 7. ΔL_{max} – это максимальная разность длин трасс распространения между компонентами, уровень которых превышает пороговое значение, которое на 20 дБ ниже наивысшего уровня отраженных волн, как показано на рисунке 8. На этом рисунке a (в дБ) – это отношение мощности прямой волны к мощности суммы отраженных волн, $a = -\infty$ дБ представляет ситуацию отсутствия прямой видимости. Если $2\Delta f\Delta L_{max}$ меньше 10 МГц · м, то уровни полученных сигналов в случае прямой видимости и в случае отсутствия прямой видимости следуют распределению Рэля и распределению Накагами-Райса, соответствующим области узкополосного замирания. Если $2\Delta f\Delta L_{max}$ превышает 10 МГц · м, оно соответствует области широкополосного замирания, в которой глубина замирания уменьшается, а уровни полученных сигналов не соответствуют ни распределению Рэля, ни распределению Накагами-Райса.

РИСУНОК 7

Соотношения между глубиной замирания и $2\Delta f\Delta L_{max}$  a : отношение мощностей.

P.1411-07

РИСУНОК 8

Модель для расчета ΔL_{max} 

P.1411-08

11 Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для подхода, основанного на структуре трассы

11.1 Классификация структуры трассы

В зоне заполнения, кроме сельской зоны, структура трассы для беспроводных каналов может быть разбита на 9 категорий, как показано в таблице 17. Классификация полностью основана на реальной среде распространения радиоволн посредством анализа распределения высоты и плотности застройки для различных типичных расположений с использованием базы данных ГИС (Географическая информационная система).

ТАБЛИЦА 17

Классификация структур трассы для ММО-канала

Структура трассы		Плотность
Большая высота (выше 25 м)	Высокая плотность (HRHD)	выше 35%
	Средняя плотность (HRMD)	20~35%
	Низкая плотность (HRLD)	ниже 20%
Средняя высота (12 м ~ 25 м)	Высокая плотность (HRHD)	выше 35%
	Средняя плотность (HRMD)	20~35%
	Низкая плотность (HRLD)	ниже 20%
Небольшая высота (ниже 12 м)	Высокая плотность (HRHD)	выше 35%
	Средняя плотность (HRMD)	20~35%
	Низкая плотность (HRLD)	ниже 20%

11.2 Метод статистического моделирования

Обычно данные измерений бывают весьма ограниченными и неполными. Поэтому для конкретных структур и конкретных рабочих частот в целях получения параметров для модели ММО-канала может использоваться следующий метод. Измерения характеристик канала для 9 типичных структур на частоте 3,705 ГГц показали хорошее статистическое соответствие по сравнению с методом моделирования.

Модели определены для случая $h_b > h_r$. Определения параметров f , d , h_r , h_b , Δh_b и h_m даются в пункте 3.1, а B_d представляет плотность застройки. Подход, основанный на структуре трассы, действителен для следующих входных данных:

f : 800–6000 МГц;

d : 100–800 м;

h_r : 3–60 м;

h_b : $h_r + \Delta h_b$;

Δh_b : вплоть до 20 м;

h_m : 1–3 м;

B_d : 10% – 45%.

При статистическом моделировании строения генерируются абсолютно случайным образом. Общеизвестно, что высота зданий h хорошо статистически аппроксимируется распределением Рэлея $P(h)$ с параметром μ .

$$P(h) = \frac{h}{\mu^2} \exp\left(-\frac{h^2}{2\mu^2}\right). \quad (67)$$

Для получения статистических параметров распределения Рэлея для данной структуры рекомендуется использовать имеющуюся базу данных ГИС. Для горизонтального расположения зданий можно допустить равномерное распределение.

Расчет распространения радиоволн осуществляется для каждой реализации распределения характеристик зданий с использованием метода трассировки лучей. При моделировании рекомендуется выполнить отражение 15 раз и дифракцию 2 раза. Также важно учесть проникновение через здания. Рекомендуется соответствующим образом установить порог принимаемой мощности для рассмотрения проникновения через здания. Чтобы получить параметры модели, необходимо выполнить моделирование для достаточно большого количества реализаций для каждой структуры пути. Рекомендуется предусмотреть не менее 4 реализаций. Для каждой реализации в области

вычислений должно быть размещено достаточное количество приемников, чтобы получить статистически значимые данные. Рекомендуется, чтобы в каждом 10-метровом подынтервале расстояния было размещено не менее 50 приемников. Высоты передающей и приемной антенн должны быть установлены в надлежащие значения. Рекомендуется установить значения диэлектрической постоянной и проводимости в $\epsilon_r = 7,0$, $\sigma = 0,015$ сим/м для зданий и $\epsilon_r = 2,6$, $\sigma = 0,012$ сим/м – для почв.

Значения параметров распределения высот зданий в типичных случаях приведены в таблице 18. Размеры зданий равны 30×20 м², 25×20 м² и 20×20 м² для больших, средних и небольших высот. Плотность застройки задана равной 40%, 30% и 20% для высокой, средней и низкой плотности.

ТАБЛИЦА 18

Параметры распределения высот зданий для статистического моделирования

Структура трассы	Параметр μ распределения Рэлея	Диапазон распределения высот зданий (м)	Средняя высота здания (м)
HRHD	18	12,3~78,6	34,8
HRMD		12,5~70,8	34,4
HRLD		13,2~68,0	34,2
MRHD	10	7,3~41,2	19,5
MRMD		7,2~39,0	19,6
MRLD		7,4~40,4	19,4
LRHD	6	2,1~23,1	9,1
LRMD		2,5~22,2	9,4
LRLD		2,5~23,5	9,5

11.3 Модель потерь на трассе

Модель потерь на трассе в настоящей Рекомендации определяется выражениями:

$$PL = PL_0 + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d) + S \quad (\text{дБ}); \quad (68)$$

$$PL_0 = -27,5 + 20 \cdot \log_{10}(f) \quad (\text{дБ}), \quad (69)$$

где n – показатель степени потерь на трассе. S – случайная переменная, представляющая случайное рассеивание вокруг линии регрессии с нормальным распределением, а стандартное отклонение S обозначено как σ_s . Единицами измерения f и d являются МГц и метры (м) соответственно.

Параметры потерь на трассе для типичных случаев 9 структур трассы, полученные в результате статистического моделирования на частоте 3,705 ГГц, представлены в таблице 19. Значения, приведенные в таблице, подходят для всех приемников с высотой 2 м, расположенных по трассе на расстояниях от 100 м до 800 м.

ТАБЛИЦА 19

Параметры потерь на трассе для 9 структур трассы на частоте 3,705 ГГц

Структура трассы	Высота передающей антенны (м)	Средняя плотность застройки (%)	n	σ_s
HRHD	50	40	3,3	9,3
HRMD	50	30	2,9	6,3
HRLD	50	20	2,5	3,6
MRHD	30	40	2,8	4,7
MRMD	30	30	2,6	4,9
MRLD	30	20	2,3	2,7
LRHD	20	40	2,4	1,3
LRMD	20	30	2,3	1,8
LRLD	20	20	2,2	1,8

11.4 Модель разброса задержки

Среднеквадратичный разброс задержки также можно смоделировать как функцию длины трассы. Среднеквадратичный разброс задержки на трассах с преобладанием NLoS и длинами трасс 100–800 м может быть представлен моделью, зависящей от расстояния, которая определяется выражением:

$$DS = A \cdot d^B \quad (\text{нс}). \quad (70)$$

Параметры разброса задержки для типичных случаев 9 структур трассы, полученные в результате статистического моделирования на частоте 3,705 ГГц, приведены в таблице 20. Высота приемников равна 2 м, и выбросы соответствующим образом удалены, чтобы получить согласованные параметры.

ТАБЛИЦА 20

Параметры разброса задержки для 9 структур трассы на частоте 3,705 ГГц

Структура трассы	Высота передающей антенны (м)	Средняя плотность застройки (%)	Разброс задержки (нс)	
			A	B
HRHD	50	40	237	0,072
HRMD	50	30	258	0,074
HRLD	50	20	256	0,11
MRHD	30	40	224	0,095
MRMD	30	30	196	0,12
MRLD	30	20	172	0,19
LRHD	20	40	163	0,18
LRMD	20	30	116	0,23
LRLD	20	20	90	0,29

11.5 Модель разброса по углу

Разброс по углу на передаче (ASD) и приеме (ASA) вдоль трасс протяженностью 100–800 м может быть представлен моделью, зависящей от расстояния, согласно выражениям:

$$ASD = \alpha \cdot d^{\beta} \quad (\text{градусы}); \quad (71)$$

$$ASA = \gamma \cdot d^{\delta} \quad (\text{градусы}). \quad (72)$$

Параметры ASD и ASA для типичных случаев 9 структур трасс, полученные в результате статистического моделирования на частоте 3,705 ГГц, представлены в таблицах 21 и 22.

ТАБЛИЦА 21

Параметры ASD для 9 структур трассы на частоте 3,705 ГГц

Структура трассы	Высота передающей антенны (м)	Средняя плотность застройки (%)	α	β
HRHD	50	40	107	-0,13
HRMD	50	30	116	-0,18
HRLD	50	20	250	-0,31
MRHD	30	40	115	-0,22
MRMD	30	30	232	-0,33
MRLD	30	20	264	-0,37
LRHD	20	40	192	-0,33
LRMD	20	30	141	-0,29
LRLD	20	20	113	-0,24

ТАБЛИЦА 22

Параметры ASA для 9 структур трассы на частоте 3,705 ГГц

Структура трассы	Высота передающей антенны (м)	Средняя плотность застройки (%)	γ	δ
HRHD	50	40	214	-0,27
HRMD	50	30	147	-0,17
HRLD	50	20	140	-0,14
MRHD	30	40	127	-0,15
MRMD	30	30	143	-0,16
MRLD	30	20	132	-0,13
LRHD	20	40	109	-0,09
LRMD	20	30	124	-0,11
LRLD	20	20	94	-0,06