

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.1411-7
(09/2013)

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

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

| Серия | Название |
|------------|---|
| BO | Спутниковое радиовещание |
| BR | Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения |
| BS | Радиовещательная служба (звуковая) |
| BT | Радиовещательная служба (телевизионная) |
| F | Фиксированная служба |
| M | 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 МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2014 г.

© ITU 2014

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

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1411-7

**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)

(1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012-2013)

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,

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, разброса по углу и взаимной корреляции на этих трассах.

Модель распространения для этого метода симметрична в том смысле, что она одинаковым образом учитывает оба оконечных радиоустройства на обоих концах. С точки зрения модели не имеет значения, какой терминал является передатчиком, а какой – приемником. В связи с этим используются термины "Станция 1" и "Станция 2", обозначающие терминалы в начале и конце трассы распространения радиосигнала, соответственно.

2 Физические рабочие условия и определение типов сот

Описываемые в настоящей Рекомендации условия классифицируются только с точки зрения распространения радиоволн. Условия, т. е. конструкция и высота зданий, использование подвижных терминалов (для пешеходов/автомобильных) и положение антенн, оказывает влияние на распространение радиоволн. Выделяют пять различных типов условий, которые считаются наиболее характерными. Например, не рассматриваются холмистые зоны, поскольку они менее характерны в крупных городах. Этим пять видов условий перечислены в таблице 1. Признавая широкое разнообразие условий внутри каждого класса, не ставится целью смоделировать все возможные случаи; предполагается дать только модели распространения, характерные для наиболее часто встречающихся типов условий.

ТАБЛИЦА 1

Физические рабочие условия – ухудшение распространения радиоволн

| Условия | 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 |

ТАБЛИЦА 1 (окончание)

| Условия | Описание и рассматриваемые ухудшения распространения радиоволн |
|--|--|
| Городская зона малоэтажной застройки/ пригородная зона | <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 |
| 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 каждого из пяти различных типов условий 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 условия – типичная скорость перемещения подвижных терминалов

| Условия | Скорость пользователей-пешеходов (м/с) | Скорость пользователей, едущих в автомобиле |
|--|--|--|
| Городская зона высотной застройки/ городская зона многоэтажной застройки | 1,5 | Типичная скорость движения в центре города составляет около 50 км/ч (14 м/с) |
| Городская зона малоэтажной застройки/ 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

В настоящей Рекомендации могут быть рассмотрены три уровня местоположения станции, а именно: 1) над крышами (обозначена как L1 на рисунке 1); 2) ниже уровня крыш, но выше уровня головы (L2); и 3) на уровне или ниже уровня головы (L3). В целом, могут быть рассмотрены шесть различных видов линий, в зависимости от местоположений станций, каждая из которых может быть линией LoS или NLoS.

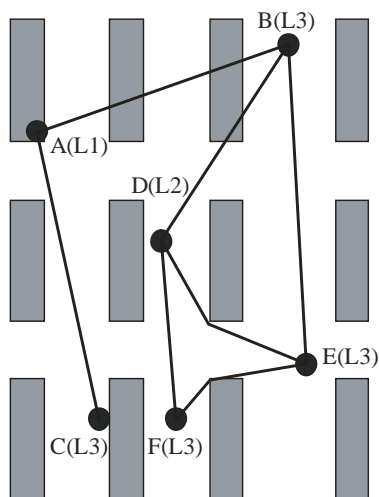
На рисунке 1 показаны типичные ситуации распространения в городских или пригородных зонах. Если одна станция (A) установлена выше уровня крыш, а другая станция (B или C) расположена на уровне головы, то соответствующая сота представляет собой микросоту. Трасса может быть трассой LoS (A-C) или NLoS (A-B). Распространение между станциями A и B происходит главным образом поверх крыш. Если одна станция (D) установлена ниже уровня крыш, но выше уровня головы, а другая станция (E или F) расположена на уровне головы в условиях городской или пригородной зоны, то соответствующая ячейка характеризуется условиями микросоты или пикосоты. В сотах этого типа радиоволны распространяются главным образом по уличным каньонам. Для линий связи между подвижными терминалами можно предположить, что оба конца линии находятся на уровне головы. Трасса может быть трассой LoS (B-E) или NLoS (E-F).

3.1.1 Распространение радиоволн над крышами вне прямой видимости (NLoS)

Типичный случай NLoS (линия A-B на рисунке 1) показан на рисунке 2. Ниже этот случай называется NLoS1.

РИСУНОК 1

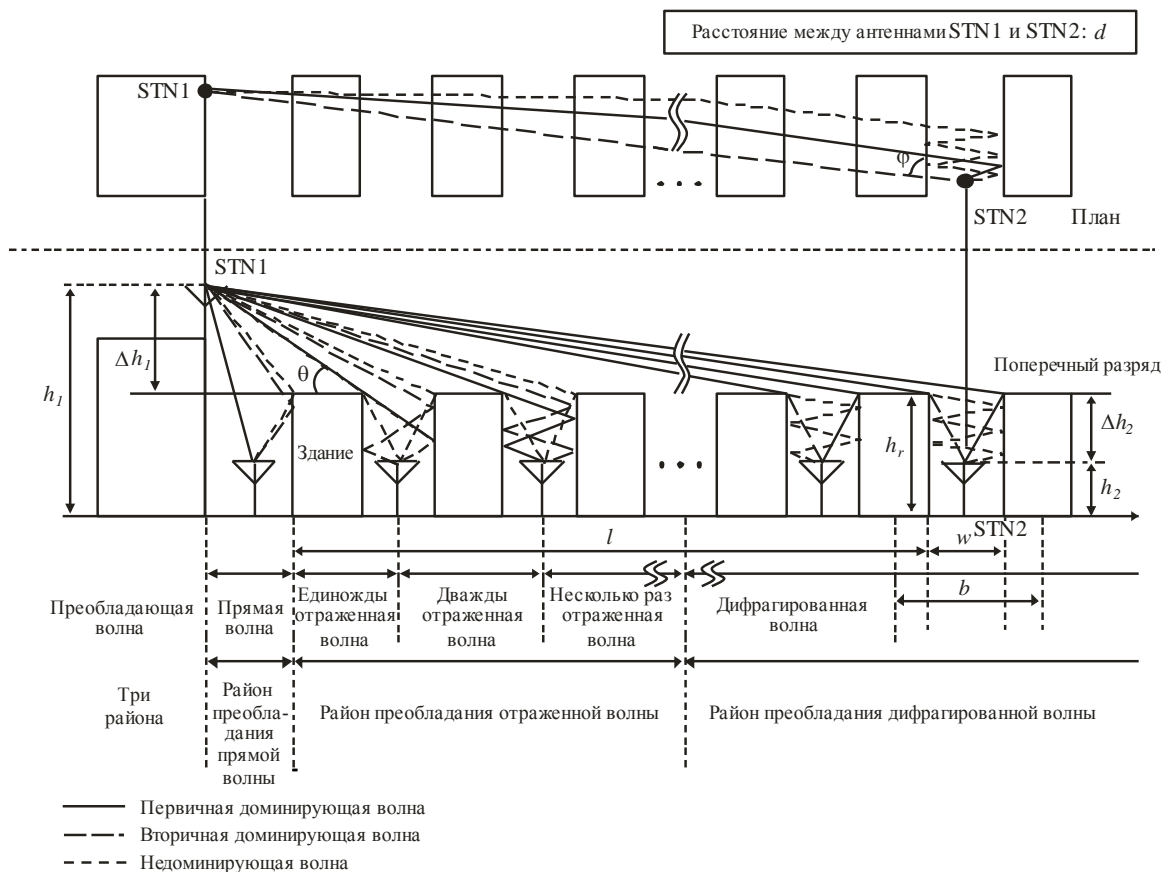
Типичная ситуация распространения в городских зонах



P.1411-01

РИСУНОК 2

Определение параметров для случая NLoS1



P.1411-02

Соответствующие параметры для этой ситуации:

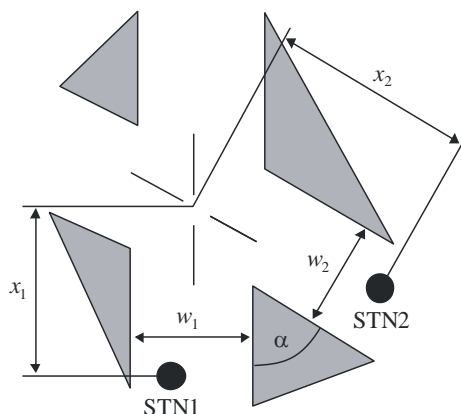
- h_r : средняя высота зданий (м);
- w : ширина улицы (м);
- b : среднее расстояние между зданиями (м);
- φ : ориентация улицы относительно прямой трассы (градусы);
- h_1 : высота антенны Станции 1 (м);
- h_2 : высота антенны Станции 2 (м);
- l : длина участка трассы, занимаемого зданиями (м);
- d : расстояние от Станции 1 до Станции 2.

Случай NLoS1 часто встречается в условиях жилой/сельской зоны для всех типов сот и преобладает в микросотах в условиях городской зоны малоэтажной застройки /пригородной зоны. 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 D-E 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 Станции 1 (м);
- w_2 : ширина улицы в точке расположения Станции 2 (м);
- x_1 : расстояние от Станции 1 до перекрестка (м);
- x_2 : расстояние от Станции 2 до перекрестка (м);
- α : угол перекрестка (рад).

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

3.1.3 Трассы прямой видимости (LoS)

Трассы А-С, D-F и В-Е на рисунке 1 являются примерами ситуаций LoS. Одни и те же модели могут применяться для этих 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 Модели распространения в уличных каньонах

4.1.1 Ситуация LoS

Данная ситуация показана на рисунке 1 как трассы между А и С, D и F, или В и Е.

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 $L_{LoS,l}$ 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 в метрах и определяется как:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_1h_2}{\lambda}, \quad (2)$$

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

Приблизительный верхний предел $L_{LoS,u}$ 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:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_1 h_2} \right) \right|. \quad (4)$$

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 $L_{LoS,m}$ 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:

$$R_{bp} = 4 \frac{(h_1 - h_s)(h_2 - h_s)}{\lambda}, \quad (6)$$

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 занимают 10–20% площади проезжей части, а пешеходы 0,2–1% площади тротуара. При неинтенсивном движении занято 0,1–0,5% площади проезжей части и менее 0,001% площади тротуара. Ширина дороги составляет 27 м, включая тротуары шириной 6 м с обеих сторон.

ТАБЛИЦА 4

Эффективная высота дороги, h_s (интенсивный трафик)

| Частота (ГГц) | h_1 (м) | h_s (м) | |
|------------------|--------------|--------------|-------------|
| | | $h_2 = 2,7$ | $h_2 = 1,6$ |
| 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_1 (м) | h_s (м) | |
|------------------|--------------|--------------|-------------|
| | | $h_2 = 2,7$ | $h_2 = 1,6$ |
| 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 $h_1, h_2 > h_s$, 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:

$$L_{bp} = \left| 20 \log_{10} \left\{ \frac{\lambda^2}{8\pi(h_1 - h_s)(h_2 - h_s)} \right\} \right|. \quad (7)$$

С другой стороны, когда $h_1 \leq h_s$ или $h_2 \leq h_s$, точка прерывания отсутствует. Если два терминала находятся рядом ($d < R_s$), то основные потери при распространении аналогичны основным потерям при распространении в диапазоне УВЧ. Если два терминала удалены друг от друга, характеристики распространения таковы, что коэффициент ослабления имеет кубическую зависимость. Поэтому приблизительный нижний предел при $d \geq R_s$ задается как:

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

Приблизительный 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.

4.1.2 Ситуации NLoS

Данная ситуация показана на рисунке 1 как трассы между D и E.

4.1.2.1 Диапазон частот от 800 до 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).

$$L_{NLoS2} = -10 \log_{10} \left(10^{-L_r/10} + 10^{-L_d/10} \right) \quad \text{дБ} \quad (12)$$

где:

L_r : потери на отражение на трассе, определяемые как:

$$L_r = 20 \log_{10} (x_1 + x_2) + x_1 x_2 \frac{f(\alpha)}{w_1 w_2} + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{дБ} \quad (13)$$

где:

$$f(\alpha) = \frac{3,86}{\alpha^{3,5}} \quad \text{дБ} \quad (14)$$

где $0,6 < \alpha$ [рад] $< \pi$.

L_d : дифракционные потери на трассе, определяемые следующим образом:

$$L_d = 10 \log_{10} [x_1 x_2 (x_1 + x_2)] + 2D_a - 0,1 \left(90 - \alpha \frac{180}{\pi} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \quad \text{дБ} \quad (15)$$

$$D_a = \left(\frac{40}{2\pi} \right) \left[\arctan \left(\frac{x_2}{w_2} \right) + \arctan \left(\frac{x_1}{w_1} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad \text{дБ} \quad (16)$$

4.1.2.2 Диапазон 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 $h_1, h_2 < h_r$, 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:

$$L_{NLoS2} = L_{LoS} + L_c + L_{att}; \quad (17)$$

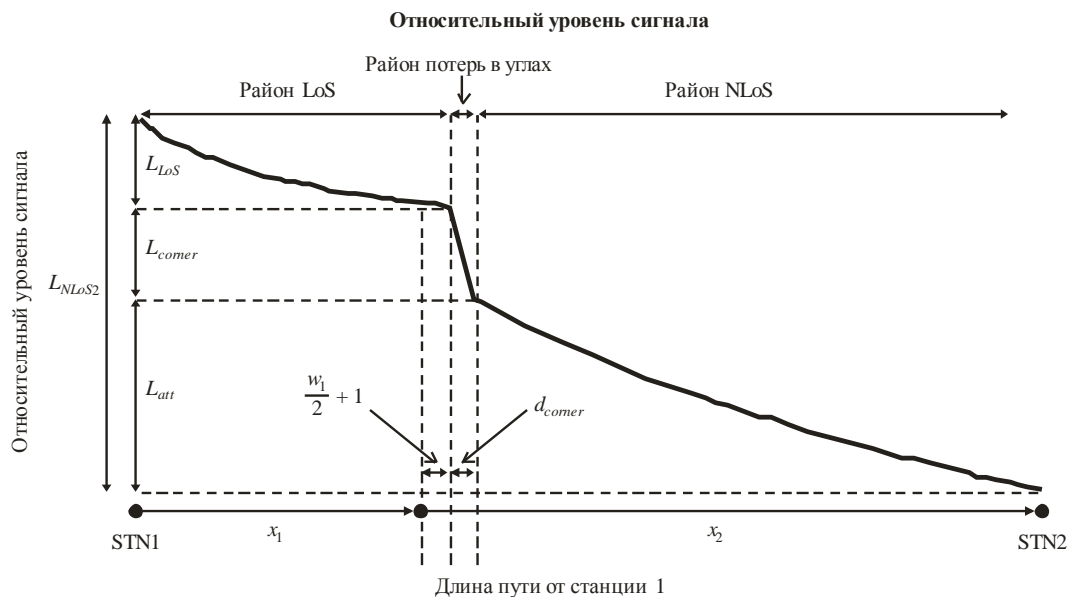
$$L_c = \begin{cases} \frac{L_{corner}}{\log_{10}(1+d_{corner})} \log_{10}(x_2 - w_1/2) & w_1/2 + 1 < x_2 \leq w_1/2 + 1 + d_{corner}; \\ L_{corner} & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{corner} \end{cases}; \quad (18)$$

$$L_{att} = \begin{cases} 10\beta \log_{10} \left(\frac{x_1 + x_2}{x_1 + w_1/2 + d_{corner}} \right) & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{corner}, \\ 0 & x_2 > w_1/2 + 1 + d_{corner} \end{cases}, \quad (19)$$

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 (18) значение L_{corner} приведено на уровне 20 дБ в условиях городской зоны и 30 дБ – в условиях жилой зоны, а значение d_{corner} равно 30 м в обоих типах условий. В уравнении (19) значение β задано шестью.

РИСУНОК 4

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



P.1411-04

В условиях жилой зоны потери на трассе не возрастают монотонно с увеличением расстояния, и поэтому данный параметр коэффициента может быть ниже его соответствующего значения в условиях городской зоны 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.

4.2 Модели распространения над крышами

В случае NLoS сигналы могут достигать станции 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 трасс А (h_1) – В (h_2) и D (h_1) – В (h_2), показанных на рисунке 1. Эти модели пригодны для:

- h_1 : 4–50 м;
- h_2 : 1–3 м;
- f : 800–5000 МГц;
2–16 ГГц для $h_1 < h_r$ 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 для пригородной зоны

Определена модель для трассы А (h_1) – В (h_2), показанной на рисунке 1. Эта модель пригодна для:

- h_r : любой высоты в м;
- Δh_1 : 1–100 м;
- Δh_2 : 4–10 (меньше, чем h_r) м;
- h_1 : $h_r + \Delta h_1$ м;
- h_2 : $h_r - \Delta h_2$ 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 Городская зона

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, а L_{msd} зависит от того, расположена ли антенна станции ниже или выше высоты зданий.

$$L_{NLoS} = \begin{cases} L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{для } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{bf} & \text{для } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

Потери в свободном пространстве определяются по формуле:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \log_{10}(d / 1000) + 20 \log_{10}(f), \quad (21)$$

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.

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log_{10}(w) + 10 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(\Delta h_2) + L_{ori}, \quad (22)$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & \text{для } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35) & \text{для } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ, \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & \text{для } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (23)$$

где:

$$\Delta h_2 = h_r - h_2. \quad (24)$$

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 1 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 :

$$d_s = \frac{\lambda d^2}{\Delta h_1^2}, \quad (25)$$

где (см. рисунок 2):

$$\Delta h_1 = h_1 - h_r. \quad (26)$$

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:

$$L_{msd} = \begin{cases} -\tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi}\right) \cdot (L1_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{для } l > d_s \text{ и } dh_{bp} > 0 \\ \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\chi}\right) \cdot (L2_{msd}(d) - L_{mid}) + L_{mid} & \text{для } l \leq d_s \text{ и } dh_{bp} > 0 \\ L2_{msd}(d) & \text{для } dh_{bp} = 0, \\ L1_{msd}(d) - \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta}\right) \cdot (L_{upp} - L_{mid}) - L_{upp} + L_{mid} & \text{для } l > d_s \text{ и } dh_{bp} < 0 \\ L2_{msd}(d) + \tanh\left(\frac{\log(d) - \log(d_{bp})}{\zeta}\right) \cdot (L_{mid} - L_{low}) + L_{mid} - L_{low} & \text{для } l \leq d_s \text{ и } dh_{bp} < 0 \end{cases} \quad (27)$$

где:

$$dh_{bp} = L_{upp} - L_{low}; \quad (28)$$

$$\zeta = (L_{upp} - L_{low}) \cdot \upsilon; \quad (29)$$

$$L_{mid} = \frac{(L_{upp} + L_{low})}{2}; \quad (30)$$

$$L_{upp} = L1_{msd}(d_{bp}); \quad (31)$$

$$L_{low} = L2_{msd}(d_{bp}) \quad (32)$$

и

$$d_{bp} = |\Delta h_1| \sqrt{\frac{l}{\lambda}}; \quad (33)$$

$$\upsilon = [0,0417];$$

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

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 $l \gg d_s$.)

$$L1_{msd}(d) = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10}(d / 1000) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b), \quad (34)$$

где:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_1) & \text{для } h_1 > h_r \\ 0 & \text{для } h_1 \leq h_r \end{cases} \quad (35)$$

является показателем потерь, который зависит от высоты антенны:

$$k_a = \begin{cases} 71,4 & \text{для } h_1 > h_r \text{ и } f > 2000 \text{ МГц} \\ 73 - 0,8\Delta h_1 & \text{для } h_1 \leq h_r, f > 2000 \text{ МГц и } d \geq 500\text{м} \\ 73 - 1,6\Delta h_1 d / 1000 & \text{для } h_1 \leq h_r, f > 2000 \text{ МГц и } d < 500\text{м} \\ 54 & \text{для } h_1 > h_r \text{ и } f \leq 2000 \text{ МГц} \\ 54 - 0,8\Delta h_1 & \text{для } h_1 \leq h_r, f \leq 2000 \text{ МГц и } d \geq 500\text{м} \\ 54 - 1,6\Delta h_1 d / 1000 & \text{для } h_1 \leq h_r, f \leq 2000 \text{ МГц и } d < 500\text{м} \end{cases} \quad (36)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{для } h_1 > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_1}{h_r} & \text{для } h_1 \leq h_r \end{cases} \quad (37)$$

$$k_f = \begin{cases} -8 & \text{для } f > 2000 \text{ МГц} \\ -4 + 0,7(f/925 - 1) & \text{для города средних размеров, а также пригорода} \\ & \text{центры со средней плотностью деревьев и } f \leq 2000 \text{ МГц} \\ -4 + 1,5(f/925 - 1) & \text{для центральной зоны городской агломерации и } f \leq 2000 \text{ МГц} \end{cases} \quad (38)$$

Расчет L_{2msd} для случая $l < d_s$

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

$$L_{2msd}(d) = -10 \log_{10} (Q_M^2), \quad (39)$$

где:

$$Q_M = \begin{cases} 2,35 \left(\frac{\Delta h_1}{d} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0,9} & \text{для } h_1 > h_r + \delta h_u \\ \frac{b}{d} & \text{для } h_1 \leq h_r + \delta h_u \text{ и } h_1 \geq h_r + \delta h_l \\ \frac{b}{2\pi d} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right) & \text{для } h_1 < h_r + \delta h_l \end{cases} \quad (40)$$

и

$$\theta = \arctan \left(\frac{\Delta h_1}{b} \right); \quad (41)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_1^2 + b^2} \quad (42)$$

и

$$\delta h_u = 10^{-\log_{10}\left(\sqrt{\frac{b}{\lambda}}\right) - \frac{\log_{10}(d)}{9} + \frac{10}{9}\log_{10}\left(\frac{b}{2,35}\right)}; \quad (43)$$

$$\delta h_l = \frac{0,00023b^2 - 0,1827b - 9,4978}{(\log_{10}(f))^{2,938}} + 0,000781b + 0,06923. \quad (44)$$

4.2.2 Пригородная зона

Модель распространения радиоволн для случая NLoS1, основанная на геометрической оптике (GO), представлена на рисунке 2. На этом рисунке показано, что состав приходящих волн на Станцию 2 изменяется в зависимости от расстояния между Станцией 1 и Станцией 2. Прямая волна может достичь Станции 2 только в том случае, если расстояние между Станцией 1 и Станцией 2 очень короткое. Отраженные несколько раз (один, два или три раза) волны, имеющие относительно высокий уровень мощности, могут достичь Станции 2 в том случае, если расстояние между Станцией 1 и Станцией 2 относительно небольшое. Если же расстояние между Станцией 1 и Станцией 2 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 Станции 2. 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 Станцию 2. Это районы преобладания прямых волн, отраженных волн и дифрагированных волн. Потери в каждом районе, основанные на GO, выражаются следующим образом.

$$L_{NLoS1} = \begin{cases} 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) & \text{для } d < d_0 \quad (\text{Район преобладания прямых волн}) \\ L_{0n} & \text{для } d_0 \leq d < d_{RD} \quad (\text{Район преобладания отраженных волн}) \\ 32,1 \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_{RD}}\right) + L_{d_{RD}} & \text{для } d \geq d_{RD} \quad (\text{Район преобладания дифрагированных волн}) \end{cases}, \quad (45)$$

где:

$$L_{0n} = \begin{cases} L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d - d_k), & \text{когда } d_k \leq d < d_{k+1} < d_{RD} \\ & (k = 0, 1, 2, \dots) \\ L_{d_k} + \frac{L_{d_{RD}} - L_{d_k}}{d_{RD} - d_k} \cdot (d - d_k), & \text{когда } d_k \leq d < d_{RD} < d_{k+1} \end{cases}; \quad (46)$$

$$d_k = \frac{1}{\sin \varphi} \cdot \sqrt{B_k^2 + (h_1 - h_2)^2}; \quad (47)$$

$$L_{d_k} = 20 \cdot \log_{10}\left\{\frac{4\pi d_{kp}}{0,4^k \cdot \lambda}\right\}; \quad (48)$$

$$d_{RD}(f) = 0,625 \cdot (d_3 - d_1) \cdot \log_{10}(f) + 0,44 \cdot d_1 + 0,5 \cdot d_2 + 0,06 \cdot d_3 \quad (0,8 \text{ ГГц} \leq f \leq 20 \text{ ГГц}); \quad (49)$$

$$L_{d_{RD}} = L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d_{RD} - d_k) \quad (d_k \leq d_{RD} \leq d_{k+1}); \quad (50)$$

$$d_{kp} = \frac{1}{\sin \varphi_k} \cdot \sqrt{A_k^2 + (h_1 - h_2)^2}; \quad (51)$$

$$A_k = \frac{w \cdot (h_1 - h_2) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - h_2)}; \quad (52)$$

$$B_k = \frac{w \cdot (h_1 - h_2) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - h_2)} - k \cdot w; \quad (53)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{B_k}{A_k} \cdot \tan \varphi \right). \quad (54)$$

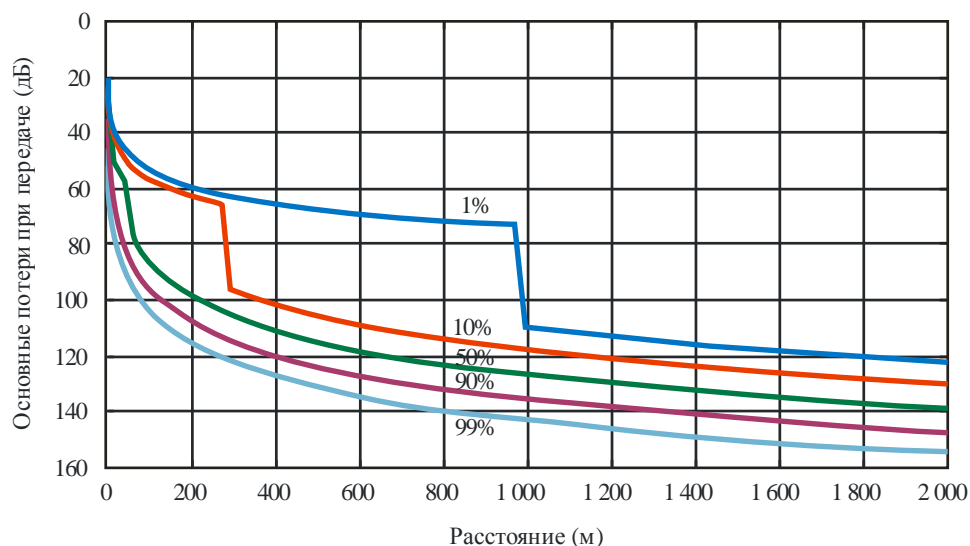
4.3 Модели распространения радиоволн между терминалами, расположенными на высотах ниже уровня крыш и приблизительно до уровня улицы

Модель, описываемая ниже, предназначена для расчета основных потерь при передаче между двумя терминалами небольшой высоты в условиях городской зоны. Данная ситуация показана на рисунке 1 как трассы между D и F, D и E, B и E или E и F. Она включает как районы LoS, так и районы 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)



P.1411-05

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 (%):

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

Как вариант, 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. Как вариант, 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:

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

высота крыши = 3 м для скатных крыш;

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

4.5 Дополнительные потери

4.5.1 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.

4.5.2 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.

5 Модели многолучевого распространения

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

5.1 Профиль задержки

5.1.1 Разброс задержки в условиях распространения над крышами

Характеристики разброса задержки при многолучевом распространении для случаев LoS и NLoS в условиях городской зоны 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 этих условиях определяется по формуле:

$$S_u = \exp(A \cdot L + B) \quad \text{нс}, \quad (62)$$

где A и B – коэффициенты среднеквадратичного разброса задержки, а L – потери на трассе (дБ). В таблице 9 содержатся типичные значения этих коэффициентов для расстояний от 100 м до 1 км, основанные на измерениях, проведенных в городских зонах.

ТАБЛИЦА 9

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 условиях городской зоны при высоте антенны Станции 1, равной 40 м и 60 м, и высоте антенны Станции 2, равной 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 условиях пригородной зоны при высоте антенны Станции 1, равной 20 м, и высоте антенны Станции 2, равной 2,0 м и 2,8 м, были получены на основе результатов измерений. В таблице 10 приведены измеренные значения среднеквадратичного разброса задержки для частот от 1,9 ГГц до 5,8 ГГц для случаев, когда интегральная вероятность составляет 50% и 95%.

ТАБЛИЦА 10

Типичные значения среднеквадратичного разброса задержки*

| Условия измерения | | | | | | Среднеквадратичный разброс задержки (нс) | |
|--|----------|---------------|----------------|-----------|----------------|--|------|
| Зона | Сценарий | Частота (ГГц) | Высота антенны | | Расстояние (м) | 50% | 95% |
| | | | h_1 (м) | h_2 (м) | | | |
| Городская зона многоэтажной застройки ⁽¹⁾ | | 1,9–2,1 | 46 | 1,7 | 100–1000 | 490 | 1490 |
| Пригородная зона ⁽²⁾ | | 2,5 | 12 | 1 | 200–1000 | 158 | 469 |
| Городская зона высотной застройки ⁽¹⁾ | LoS | 2,5 | 100 | 2 | 100–1000 | 208 | 461 |
| | NLoS | | | | | 407 | 513 |
| Городская ⁽¹⁾ | | 3,7 | 60 | 2 | 100–1000 | 232 | 408 |
| | | | 40 | 2 | 100–1000 | 121 | 357 |
| Пригородная ⁽¹⁾ | | 3,7 | 20 | 2 | 100–1000 | 125 | 542 |
| | | 5,2 | 20 | 2,8 | 100–1000 | 189 | 577 |
| Пригородная ⁽²⁾ | | 3,5 | 12 | 1 | 200–1000 | 161 | 493 |
| | | 5,8 | 12 | 1 | 200–1000 | 168 | 415 |

⁽¹⁾ При расчете среднеквадратичного разброса задержки использовалось пороговое значение, равное 30 дБ.

⁽²⁾ При расчете среднеквадратичного разброса задержки использовалось пороговое значение, равное 20 дБ. Изменения проводились с использованием направленных антенн на выходе передатчика (ширина луча 120° в азимутальной плоскости на частоте 5,8 ГГц и 30° на частотах 2,5 ГГц и 3,5 ГГц) и ненаправленные антенны на входе приемника. Задержка по времени равна 100 нс.

5.1.2 Разброс задержки в условиях распространения ниже уровня крыш

5.1.2.1 Случай ненаправленной антенны

Характеристики разброса задержки при многолучевом распространении в случае LoS и использования ненаправленной антенны в условиях городской зоны 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:

$$a_s = C_a d^{\gamma_a} \quad \text{нс,} \quad (63)$$

и стандартным отклонением, определяемым по формуле:

$$\sigma_s = C_\sigma d^{\gamma_\sigma} \quad \text{нс,} \quad (64)$$

где коэффициенты C_a , γ_a , C_σ и γ_σ зависят от высоты антенны и условий распространения. В таблице 11 перечисляются некоторые типичные значения этих коэффициентов для расстояний 50–400 м, полученные на основе измерений в городских и жилых зонах.

ТАБЛИЦА 11

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

| Условия измерения | | | | a_s | | σ_s | |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|---------|------------|------------|-----------------|
| Зона | f (ГГц) | h_1 (м) | h_2 (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 | | | | | |
| 8,05 | 5 | 2,5 | 0,97 | 0,78 | 1,42 | 0,52 | |
| 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:

$$P(t) = P_0 + 50(e^{-t/\tau} - 1) \quad \text{дБ,} \quad (65)$$

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:

$$\tau = 4 S + 266 \quad \text{нс.} \quad (66)$$

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.)

5.1.2.2 Случай направленной антенны

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 условиях городской зоны 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 12 приведены уравнения для получения коэффициентов относительно ширины луча антенны по уровню половинной мощности для формулы (64) 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 12

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

| Условия измерения | | | | a_s | |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|---|
| Зона | f (ГГц) | h_1 (м) | h_2 (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 .

5.2 Угловой профиль

5.2.1 Разброс по углу в условиях распространения ниже уровня крыш

Среднеквадратичный разброс по углу, как определено в Рекомендации МСЭ-R P.1407, в азимутальном направлении в условиях микросот или пикосот городской зоны плотной застройки был получен на основе результатов измерений, произведенных на частоте 8,45 ГГц. Приемная 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 случаях LoS на частоте 0,781 ГГц. Для получения углового профиля используется четырехэлементная ненаправленная линейная антенная решетка с методом формирования луча по Бартлетту.

Были получены коэффициенты для среднеквадратичного разброса по углу, показанные в таблице 13.

ТАБЛИЦА 13

Типичные коэффициенты для характеристик зависимости среднеквадратичного разброса по углу от расстояния

| Условия измерения | | | | Среднее значение (градусы) | Стандартное отклонение (градусы) | Примечание |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|--|------------|
| Зона | f (ГГц) | h_1 (м) | h_2 (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 |

5.3 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 определено в Рекомендации МСЭ-R P.1407.

5.3.1 Условия распространения над крышами

В таблице 14 приведены результаты для ряда компонентов сигнала для условий распространения над крышами, полученные на основании измерений в различных сценариях, таких как тип условий, полосы частот и высоты антенн.

ТАБЛИЦА 14

Максимальное количество компонентов сигнала для условий распространения над крышами

| Тип условий | Разрешение по задержке времени | Частота (ГГц) | Высота антенны (м) | | Расстояние (м) | Максимальное количество компонентов сигнала | | | | | |
|------------------|--------------------------------|---------------|--------------------|-------|----------------|---|-----|------|-----|-------|-----|
| | | | h_1 | h_2 | | 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 |
| | 20 нс | 3,35 | 55 | 2,7 | 150–590 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 13 |
| | 20 нс | 8,45 | 55 | 2,7 | 150–590 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 12 |
| Пригородная зона | 175 нс | 2,5 | 12 | 1 | 200–1 500 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| | 175 нс | 3,5 | 12 | 1 | 200–1 500 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 5 |
| | 50 нс | 3,67 | 40 | 2,7 | 0–5 000 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 5 |
| | 100 нс | 5,8 | 12 | 1 | 200–1 500 | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 5 |

Для измерений, описанных в пункте 5.1.1, в таблице 15 приводится интервал разностной задержки времени для четырех наиболее сильных компонентов относительно компонента, поступившего первым, а также их соответствующие амплитуды.

ТАБЛИЦА 15

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

| Тип условий | Разрешение по задержке времени | Частота (ГГц) | Высота антенны (м) | | Расстояние (м) | Дополнительная задержка времени (мкс) | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---------------|--------------------|-------|----------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | h_1 | h_2 | | 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 |

5.3.2 Условия распространения ниже уровня крыш

В таблице 16 приведены результаты для ряда компонентов сигнала для условий распространения ниже уровня крыш, полученные на основании измерений в различных сценариях, таких как тип условий, полосы частот и высоты антенн.

ТАБЛИЦА 16

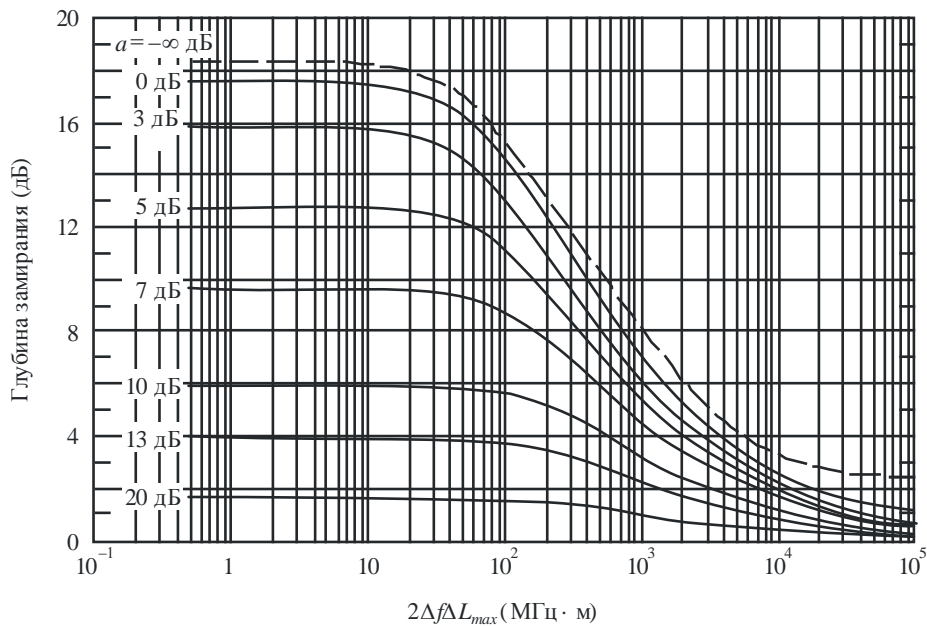
Максимальное количество компонентов сигнала для условий распространения ниже уровня крыш

| Тип условий | Разрешение по задержке времени | Частота (ГГц) | Высота антенны (м) | | Расстояние (м) | Максимальное количество компонентов сигнала | | | | | |
|----------------|--------------------------------|---------------|--------------------|-------|----------------|---|-----|------|-----|-------|-----|
| | | | h_1 | h_2 | | 3 дБ | | 5 дБ | | 10 дБ | |
| | | | | | | 80% | 95% | 80% | 95% | 80% | 95% |
| 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 |
| | 20 нс | 8,45 | 4 | 1,6 | 0–200 | 1 | 3 | 2 | 3 | 4 | 6 |
| | 20 нс | 15,75 | 4 | 1,6 | 0–200 | 1 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | | 0–1 000 | 2 | 3 | 2 | 4 | 6 | 10 |
| Жилая зона | 20 нс | 3,35 | 4 | 2,7 | 0–480 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |

5.4 Характеристики замирания

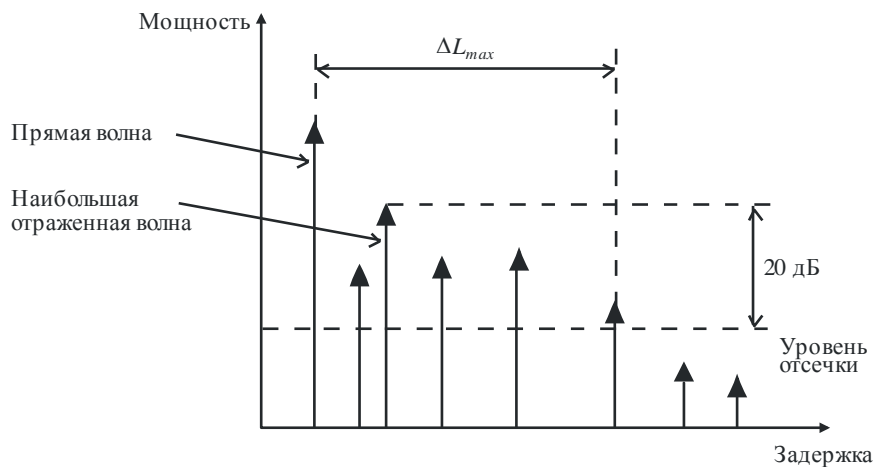
Глубина замирания, определяемая как разность между 50-процентным и 1-процентным значениями интегральной вероятности уровней полученных сигналов, выражается как функция произведения ($2\Delta f\Delta L_{max}$ МГц · м) ширины полосы пропускания приемника $2\Delta f$ (МГц) и максимальной разности длин трасс распространения ΔL_{max} (м), как показано на рисунке 6. 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 7. 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 Рэлея 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 Рэлея, ни распределению Накагами-Райса.

РИСУНОК 6

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

P.1411-06

РИСУНОК 7

Модель для расчета ΔL_{max} 

P.1411-07

6 Характеристики поляризации

Избирательность по кроссполяризации (XPD), определенная в Рекомендации МСЭ-R P.310, различается в зонах LoS и NLoS в условиях микросоты городской зоны плотной застройки 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.

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

7.1 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 реальных условиях 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% |

7.2 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 $h_1 > h_r$. Определения параметров f , d , h_r , h_1 , Δh_1 и h_2 даются на рисунке 2, 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_1 : $h_r + \Delta h_1$;

Δh_1 : вплоть до 20 м;

h_2 : 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 |

7.3 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 |

7.4 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) | |
|------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------|
| | | | <i>A</i> | <i>B</i> |
| 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 |

7.5 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

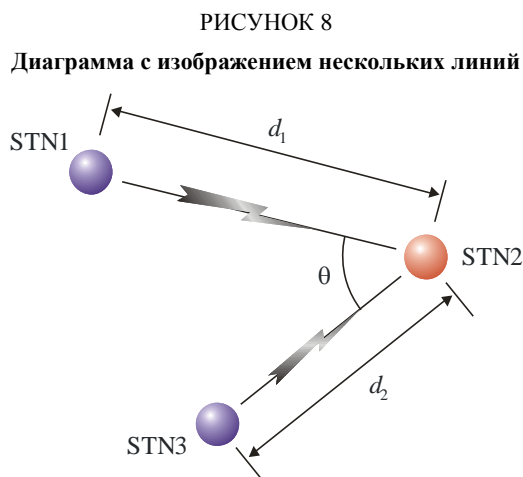
Параметры ASA для 9 структур трассы на частоте 3,705 ГГц

| 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 |

8 Модель взаимной корреляции для канала с несколькими линиями

8.1 Определение параметров

Модель взаимной корреляции для канала с несколькими линиями в условиях жилой зоны была разработана на основе данных измерений на частоте 3,7 ГГц и на расстояниях от 50 до 600 м. На рисунке 8 показана геометрическая диаграмма канала с несколькими линиями. Для геометрического моделирования канала с несколькими линиями используются следующие два параметра: угол разноса и относительное расстояние.



P.1411-08

Угол разноса θ – это угол между прямой линией STN1-STN2 и прямой линией STN3-STN2. Относительное расстояние \tilde{d} определяется выражением:

$$\tilde{d} = \log_{10} \frac{d_1}{d_2} \quad (73)$$

где d_1 и d_2 представляют, соответственно, расстояние между Станцией 1 и Станцией 2, а также между Станцией 3 и Станцией 2. Если Станция 2 удалена от Станции 1 и Станции 3 на одинаковое расстояние, то $\tilde{d} = 0$.

Диапазон параметров θ и \tilde{d} определяется соотношением,

$$0^\circ < \theta < 180^\circ, -0,3 \leq \tilde{d} \leq 0,3 \quad (74)$$

8.2 Взаимная корреляция долговременных пространственно-временных параметров

Долговременные пространственно-временные параметры, используемые в модели взаимной корреляции, включают:

- замирание вследствие затенения (SF);
- коэффициент К (KF);
- разброс задержки (DS);
- разброс по углу прихода (ASA);
- разброс по углу выхода (ASD).

Модели взаимной корреляции долговременных пространственно-временных параметров линии STN1-STN2 и линии STN3-STN2 задаются следующими уравнениями.

Модели взаимной корреляции (ρ) параметров SF, KF, DS, ASA и ASD двух линий для угла разноса определяются следующими выражениями:

$$\rho_{(SF,KF,DS,ASA)}(\theta) = A \cdot \exp(-\theta^2/B) \quad (75)$$

$$\rho_{ASD}(\theta) = A \cdot \ln(\theta) + B \quad (76)$$

В таблице 23 показаны, соответственно, типичные коэффициенты каждой модели взаимной корреляции для угла разноса, полученные на основе измерений в типичных условиях жилой зоны на частоте 3,7 ГГц.

ТАБЛИЦА 23

Типичные коэффициенты моделей взаимной корреляции долговременных пространственно-временных параметров для угла разноса

| Параметр | Зона | Частота (ГГц) | Высота антенны | | Коэффициенты взаимной корреляции | | | |
|--------------------------------|-------|---------------|-------------------|-----------|----------------------------------|----------------------|-------------|--------------|
| | | | h_1 и h_3 (м) | h_2 (м) | A | | B | |
| | | | | | Сред. знач. | Станд. откл. | Сред. знач. | Станд. откл. |
| Замирание вследствие затенения | Жилая | 3,7 | 25 | 2 | 0,749 | $4,3 \times 10^{-2}$ | 619 | 89 |
| Коэффициент К | | | | | 0,295 | $4,9 \times 10^{-3}$ | 2 129 | 6 |
| Разброс задержки | | | | | 0,67 | $7,0 \times 10^{-2}$ | 1 132 | 119 |
| Разброс по углу прихода | | | | | 0,582 | $2,1 \times 10^{-3}$ | 1 780 | 484 |
| Разброс по углу выхода | | | | | -0,0989 | $9,2 \times 10^{-4}$ | 0,483 | 0,016 |

Модели взаимной корреляции (ρ) параметров SF, KF, DS, ASA и ASD двух линий для относительного расстояния определяются следующими выражениями:

$$\rho_{(SF,KF,DS,ASA)}(\tilde{d}) = A \cdot \exp(-|\tilde{d}|/B) \quad (77)$$

$$\rho_{ASD}(\tilde{d}) = A \cdot |\tilde{d}| + B \quad (78)$$

В таблице 24 показаны, соответственно, типичные коэффициенты каждой модели взаимной корреляции для относительного расстояния, полученные на основе измерений в типичных условиях жилой зоны на частоте 3,7 ГГц.

ТАБЛИЦА 24

Типичные коэффициенты моделей взаимной корреляции долговременных пространственно-временных параметров для относительного расстояния

| Параметр | Зона | Частота (ГГц) | Высота антенны | | Коэффициенты взаимной корреляции | | | |
|--------------------------------|-------|------------------|----------------------|--------------|----------------------------------|----------------------|----------------|----------------------|
| | | | h_1 и h_3 (м) | h_2 (м) | A | | B | |
| | | | | | Сред. знач. | Станд. откл. | Сред. знач. | Станд. откл. |
| Замирание вследствие затенения | Жилая | 3,7 | 25 | 2 | 0,572 | $1,4 \times 10^{-2}$ | 0,38 | $4,9 \times 10^{-2}$ |
| Коэффициент К | | | | | 0,429 | $2,8 \times 10^{-3}$ | 0,27 | $7,1 \times 10^{-3}$ |
| Разброс задержки | | | | | 0,663 | $4,6 \times 10^{-2}$ | 0,38 | $1,6 \times 10^{-1}$ |
| Разброс по углу прихода | | | | | 0,577 | $1,1 \times 10^{-2}$ | 0,38 | $2,1 \times 10^{-2}$ |
| Разброс по углу выхода | | | | | 0,51 | $1,9 \times 10^{-1}$ | 0,196 | $4,2 \times 10^{-2}$ |

Модель взаимной корреляции (ρ) параметров SF, KF, DS, ASA и ASD двух линий для угла разноса и относительного расстояния определяются следующим выражением:

$$\rho_{(SF,KF,DS,ASA,ASD)}(\theta, \tilde{d}) = A \cdot \exp\left(-\frac{\theta^2}{B}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\tilde{d}^2}{C}\right) \quad (79)$$

В таблице 25 показаны типичные коэффициенты модели взаимной корреляции для угла разноса и относительного расстояния, полученные на основе измерений в типичных условиях жилой зоны на частоте 3,7 ГГц.

ТАБЛИЦА 25

Типичные коэффициенты модели взаимной корреляции долговременных пространственно-временных параметров для угла разноса и относительного расстояния

| Параметр | Зона | Частота (ГГц) | Высота антенны | | Коэффициенты взаимной корреляции | | | | | |
|--------------------------------|-------|---------------|-------------------|-----------|----------------------------------|----------------------|-------------|--------------|-------------|----------------------|
| | | | h_1 и h_3 (м) | h_2 (м) | A | | B | | C | |
| | | | | | Сред. знач. | Станд. откл. | Сред. знач. | Станд. откл. | Сред. знач. | Станд. откл. |
| Замирание вследствие затенения | Жилая | 3,7 | 25 | 2 | 0,53 | $7,1 \times 10^{-3}$ | 29,31 | 4,6 | 0,42 | $9,2 \times 10^{-2}$ |
| Коэффициент К | | | | | 0,28 | $6,4 \times 10^{-2}$ | 22,48 | 5,9 | 0,21 | $4,2 \times 10^{-2}$ |
| Разброс задержки | | | | | 0,46 | $9,2 \times 10^{-2}$ | 29,31 | 3,7 | 0,21 | $7,1 \times 10^{-5}$ |
| Разброс по углу прихода | | | | | 0,49 | $4,9 \times 10^{-2}$ | 29,31 | 0,15 | 0,21 | $2,1 \times 10^{-2}$ |
| Разброс по углу выхода | | | | | 0,34 | $6,4 \times 10^{-2}$ | 29,31 | 2,5 | 0,21 | $2,1 \times 10^{-2}$ |

8.3 Взаимная корреляция кратковременных замираний в области задержки

Взаимная корреляция импульсной характеристики канала для линии STN1-STN2 $h_i(\tau_i)$ при задержке τ_i и импульсной характеристики канала для линии STN3-STN2 $h_j(\tau_j)$ при задержке τ_j может быть рассчитана по формуле:

$$c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) = \text{Real}\{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^*]\} \quad (80)$$

где $\bar{(\bullet)}$ представляет собой ожидание данного аргумента. Обратите внимание, что в качестве компонентов, используемых для вычисления взаимной корреляции, учитываются только те отсчеты задержки импульсных характеристик канала, мощность которых лежит в пределах динамического диапазона (5 дБ). Кроме того, путем нормирования получаются коэффициенты взаимной корреляции, имеющие значения в интервале от -1 до 1 , т. е.:

$$c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) = \text{Real}\left\{\frac{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^*]}{\sqrt{E[(h_i(\tau_i) - \bar{h}_i(\tau_i))^2]} \sqrt{E[(h_j(\tau_j) - \bar{h}_j(\tau_j))^2]}}\right\} \quad (81)$$

При составлении модели взаимной корреляции кратковременных замираний $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$ учитываются следующие три параметра:

- Максимальная взаимная корреляция кратковременных замираний $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$

$$\rho_{Fmax} = \max\{c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)\} \quad (82)$$

- Минимальная взаимная корреляция кратковременных замираний $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$

$$\rho_{Fmin} = \min\{c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)\} \quad (83)$$

- Стандартное отклонение взаимной корреляции кратковременных замираний $c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j)$

$$\rho_{Fstd} = \sqrt{\frac{1}{T_i T_j} \int (c_{h_i h_j}(\tau_i, \tau_j) - c_{h_i h_j, \text{mean}})^2 d\tau_i d\tau_j} \quad (84)$$

где T_i и T_j представляют собой длительность τ_i и τ_j , соответственно. Параметр $c_{h_i h_j, \text{mean}}$ представляет собой среднее значение функции взаимной корреляции кратковременных замираний, которое близко к нулю и имеет небольшую дисперсию независимо от угла разноса и относительного расстояния.

Модель взаимной корреляции (ρ_F) незначительных замираний в двух линиях для угла разноса задается выражением:

$$\rho_F(\theta) = A \cdot \ln(\theta) + B \quad (85)$$

В таблице 26 показаны типичные коэффициенты каждой модели взаимной корреляции для угла разноса, полученные на основе измерений в типичных условиях жилой зоны на частоте 3,7 ГГц.

ТАБЛИЦА 26

**Типичные коэффициенты моделей взаимной корреляции
кратковременных замираний для угла разноса**

| Параметр | Зона | Частота (ГГц) | Высота антенны | | Коэффициенты взаимной корреляции | | | |
|------------------------|-------|------------------|----------------------|--------------|----------------------------------|----------------------|----------------|----------------------|
| | | | h_1 и h_3 (м) | h_2 (м) | A | | B | |
| | | | | | Сред. знач. | Станд. откл. | Сред. знач. | Станд. откл. |
| Максимум | Жилая | 3,7 | 25 | 2 | $-1,09 \times 10^{-2}$ | $2,5 \times 10^{-3}$ | 0,635 | $3,5 \times 10^{-3}$ |
| Минимум | | | | | $1,62 \times 10^{-2}$ | $6,4 \times 10^{-4}$ | -0,659 | $1,1 \times 10^{-2}$ |
| Стандартное отклонение | | | | | $-9,71 \times 10^{-3}$ | $7,1 \times 10^{-5}$ | 0,417 | $7,1 \times 10^{-5}$ |

Модель взаимной корреляции кратковременных замираний в двух линиях для относительного расстояния задается выражением:

$$\rho_F(\tilde{d}) = A \cdot \exp(-|\tilde{d}|/B) \quad (86)$$

В таблице 27 показаны типичные коэффициенты каждой функции взаимной корреляции для относительного расстояния, полученные на основе измерений в типичных условиях жилой зоны на частоте 3,7 ГГц.

ТАБЛИЦА 27

**Типичные коэффициенты моделей взаимной корреляции кратковременных
замираний для относительного расстояния**

| Параметр | Зона | Частота (ГГц) | Высота антенны | | Коэффициенты взаимной корреляции | | | |
|------------------------|-------|------------------|----------------------|--------------|----------------------------------|----------------------|----------------|----------------------|
| | | | h_1 и h_3 (м) | h_2 (м) | A | | B | |
| | | | | | Сред. знач. | Станд. откл. | Сред. знач. | Станд. откл. |
| Максимум | Жилая | 3,7 | 25 | 2 | 0,628 | $2,8 \times 10^{-3}$ | 5,1 | $7,1 \times 10^{-5}$ |
| Минимум | | | | | -0,626 | $5,7 \times 10^{-3}$ | 3,75 | $1,0 \times 10^{-1}$ |
| Стандартное отклонение | | | | | 0,401 | $7,1 \times 10^{-4}$ | 5,1 | $7,1 \times 10^{-5}$ |