

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R Р.1238-11
(09/2021)

**Данные о распространении радиоволн
и методы прогнозирования
для планирования систем радиосвязи
внутри помещений и локальных зонных
радиосетей в диапазоне частот
300 МГц – 450 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-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в 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-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
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, 2022 г.

© ITU 2022

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.1238-11

Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в диапазоне частот 300 МГц – 450 ГГц*

(Вопрос МСЭ-R 211/3)

(1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012-2015-2017-2019-2021)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации приведены руководящие указания, касающиеся распространения радиоволн внутри помещений в диапазоне частот от 300 МГц до 450 ГГц. Информация представлена по следующим положениям:

- модели основных потерь передачи;
- модели разброса задержки;
- влияние поляризации и диаграммы направленности антенны;
- влияние расположения передатчика и приемника;
- влияние строительных материалов, оборудования и мебели;
- влияние перемещения объектов по помещению;
- статистическая модель при статическом использовании.

Ключевые слова

Распространение радиоволн внутри помещений, основные потери передачи, разброс задержки

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a)* что в настоящее время разрабатывается множество новых систем персональной радиосвязи, работающих на коротких расстояниях (менее 1 км) внутри помещений;
- b)* что, как показали уже имеющиеся результаты разработок и интенсивная исследовательская деятельность, существует настоятельная необходимость в создании локальных зонных радиосетей (RLAN) и беспроводных офисных АТС (WPBX);
- c)* что желательно разработать стандарты для RLAN, совместимые с системами как беспроводной, так и проводной связи;
- d)* что системы небольшой дальности, работающие с очень низкими мощностями, обладают множеством преимуществ при предоставлении услуг в среде подвижной и персональной связи, такой как сети РЧ-датчиков и беспроводные устройства, работающие в полосах белого пространства телевизионного вещания;
- e)* что знание параметров распространения радиоволн внутри зданий и характеристик помех от множества пользователей в пределах той же зоны обслуживания является определяющим фактором при проектировании систем;
- f)* что существует потребность в разработке как общих (то есть не зависящих от местоположения) моделей и рекомендаций относительно первичного планирования систем и оценки помех, так и детерминированных (или зависящих от местоположения) моделей для более точных оценок,

* Необходимы дополнительные результаты измерений для проверки приведенных в настоящей Рекомендации моделей на частотах выше 100 ГГц, как предлагается в Вопросе МСЭ-R 211-7/3.

отмечая,

- a)* что Рекомендация МСЭ-R P.1411 является руководством по распространению радиоволн на короткие расстояния при приеме на наружные системы (вне помещений) в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц, и к этой Рекомендации следует обращаться в тех ситуациях, когда существуют условия приема как внутри помещений, так и вне помещений;
- b)* что в Рекомендации МСЭ-R P.2040 представлено руководство о влиянии свойств строительных материалов и структур на распространение радиоволн;
- c)* что в Отчете МСЭ-R P.2406 содержится дополнительная базовая информация о порядке получения и вывода данных измерений и моделей в Рекомендации,

рекомендует,

что при оценке характеристик распространения для радиосистем, работающих внутри помещений в диапазоне 300 МГц – 450 ГГц, следует использовать информацию и методы, которые приведены в Приложении 1.

Приложение 1

1 Введение

Прогнозирование параметров распространения для радиосистем, работающих внутри помещений, несколько отличается от прогнозирования для наружных систем. Что касается наружных систем, то для них конечной целью является обеспечение эффективного охвата требуемой зоны (или обеспечение надежной передачи на трассе в случае систем связи пункта с пунктом), а также борьба с помехами как в пределах системы, так и для других систем. В случае же приема внутри помещений размеры зоны охвата вполне определяются геометрией здания, причем границы самого здания будут влиять на характеристики распространения. Помимо повторного использования частоты на одном и том же этаже здания, такой способ использования частот зачастую желателен и между разными этажами здания, в результате чего проблема описания помех становится трехмерной. И наконец, распространение на очень короткие расстояния, особенно при использовании миллиметровых волн, сопряжено с тем, что даже небольшие изменения в среде, непосредственно окружающей радиотрассу, могут существенно влиять на характеристики распространения.

Если заниматься конкретным планированием радиосистемы, работающей внутри помещений, то из-за сложной природы всех этих факторов потребуется точная информация о характеристиках конкретного места, в котором она будет использоваться, например его геометрия, материалы, из которых сделано здание, мебель, предполагаемые диаграммы направленности и т. д. Однако для первичного планирования системы необходимо оценить количество базовых станций, которое позволит охватить всю зону с распределенными подвижными станциями и оценить возможные помехи для других служб или между системами. Для таких случаев планирования систем необходимы модели, описывающие в общем характеристики распространения в условиях конкретной среды. В то же время расчет по такой модели не должен требовать от пользователя большого количества исходной информации.

В настоящем Приложении в основном представлены обобщенные модели, не зависящие от местоположения, и чисто качественная информация, позволяющая оценить ухудшения условий распространения, касающиеся радиоприема внутри помещений. Там, где это возможно, приводятся модели, привязанные к особенностям места. Во многих случаях данные, на базе которых разрабатывались модели, были ограничены либо по частоте, либо по условиям испытаний; выражается надежда, что предложения, представленные в настоящем Приложении, можно будет расширить, когда появятся новые данные. Аналогичным образом точность моделей будет повышаться по мере накопления опыта их использования; в настоящем Приложении представлен наилучший вариант, имеющийся на сегодняшний день.

2 Ухудшение распространения и критерии качества радиосистем внутри помещений

Ухудшения характеристик распространения в радиоканале внутри помещения обусловлены в основном:

- отражением от предметов и дифракцией над предметами (включая стены и полы) внутри помещений;
- потерями передачи при прохождении сигнала через стены, полы и другие препятствия;
- канализированием энергии сигнала на высоких частотах, особенно в коридорах;
- перемещением людей и предметов в помещении, включая, возможно, одно или оба оконечных устройства линии связи,

и вызывают такие ухудшения как:

- основные потери передачи – то есть не только основные потери передачи в свободном пространстве, но и дополнительные потери за счет препятствий и прохождения сигнала через материалы, из которых построено здание, а также возможное уменьшение основных потерь передачи в свободном пространстве за счет канализирования;
- изменение величины основных потерь передачи во времени и пространстве;
- многолучевые эффекты, вызванные отражением и дифракцией компонентов радиоволны;
- несогласованность поляризации из-за случайной юстировки мобильного терминала.

Службы беспроводной связи внутри помещений могут характеризоваться следующими особенностями:

- высокой/средней/низкой скоростью передачи данных;
- зоной покрытия каждой базовой станции (например, комната, этаж, здание);
- системой подвижной/портативной/фиксированной;
- работой в реальном времени/не в реальном времени/в квазиреальном времени;
- топологией сети (например, связь пункта с пунктом, пункта со многими пунктами, каждого пункта с каждым пунктом).

Полезно определить, какие характеристики распространения канала наиболее подходят для описания его качества в различных применениях, таких как речевая связь, передача данных с различной скоростью, передача изображений и видеослужбы. В таблице 1 перечислены наиболее существенные характеристики для типовых служб.

ТАБЛИЦА 1

Типовые службы и виды ухудшения распространения

Службы	Характеристики	Рассматриваемые виды ухудшения распространения
Беспроводная локальная зональная сеть	Высокая скорость передачи данных, одно или несколько помещений, портативная система, работа не в реальном времени, связь пункта со многими пунктами или каждого пункта с каждым пунктом	Основные потери передачи – распределение во времени и пространстве Задержка вследствие многолучевости Отношение напряженности поля желаемой моды к нежелательной
WPBX	Средняя скорость передачи данных, несколько помещений, один этаж или несколько этажей, работа в реальном времени, подвижная система, связь пункта со многими пунктами	Основные потери передачи – распределение во времени и пространстве
Пейджинг внутри помещения	Низкая скорость передачи данных, несколько этажей, работа не в реальном времени, подвижная система, связь пункта со многими пунктами	Основные потери передачи – распределение во времени и пространстве
Беспроводная служба видео внутри помещений	Высокая скорость передачи данных, несколько помещений, работа в реальном времени, подвижная или портативная система, связь пункта с пунктом	Основные потери передачи – распределение во времени и пространстве Задержка вследствие многолучевости

3 Модели основных потерь передачи

Использование модели потерь передачи внутри помещения предполагает, что и базовая станция, и переносной терминал находятся внутри одного здания. Основные потери передачи между базовой и подвижной/переносной станциями внутри помещения можно оценить с помощью любой из моделей – обобщенной, не зависящей от места, или детерминированной, учитывающей особенности места.

3.1 Обобщенные модели, не зависящие от места

Обобщенные модели, не зависящие от места, применяются в ситуациях, когда и передающая, и приемная станции расположены в пределах одного этажа. Медианные основные потери передачи определяются по формуле:

$$L_b(d, f) = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f) \text{ дБ} \quad (1)$$

с аддитивным гауссовским случайным членом $N(0, \sigma)$, имеющим нулевое математическое ожидание, и стандартное отклонение σ (дБ),

где:

- d : прямое расстояние между передающей и приемной станциями в трехмерной системе координат (м);
- f : рабочая частота (ГГц);
- α : коэффициент, связанный с увеличением основных потерь передачи в зависимости от расстояния;
- β : коэффициент, связанный со значением смещения основных потерь передачи;
- γ : коэффициент, связанный с увеличением основных потерь передачи с частотой.

При моделировании методом Монте-Карло для случаев не прямой видимости (NLoS) избыточные основные потери передачи относительно основных потерь передачи в свободном пространстве L_{FS} ($L_{FS} = 20 \log_{10}(4 \times 10^9 p d f / c)$, где c – скорость света в метрах в секунду, не превысят $10 \log_{10}(10^{0,1A} + 1)$ (дБ), где A – случайная переменная с нормальным распределением $N(\mu, \sigma)$, со средним значением $\mu = L_b(d, f) - L_{FS}$ и стандартным отклонением σ .

В таблице 2 приведены рекомендуемые значения коэффициентов для условий распространения внутри помещений.

ТАБЛИЦА 2

Коэффициенты основных потерь передачи

Тип среды	LoS/ NLoS	Диапазон частот (ГГц)	Диапазон расстояний (м)	α	β	γ	σ
Службное помещение	LoS	0,3–83,5	2–27	1,46	34,62	2,03	3,76
	NLoS	0,3–82,0	4–30	2,46	29,53	2,38	5,04
Коридор	LoS	0,3–83,5	2–160	1,63	28,12	2,25	4,07
	NLoS	0,625–83,5	4–94	2,77	29,27	2,48	7,63
Производственное помещение	LoS	0,625–70,28	2–101	2,31	24,52	2,06	2,69
	NLoS	0,625–70,28	5–108	3,79	21,01	1,34	9,05

3.2 Модели, учитывающие особенности места

Для определения основных потерь передачи или уровня напряженности поля полезно также применение моделей, учитывающих особенности места. Существуют модели для прогнозирования уровней напряженности поля внутри помещений, основанные на однородной теории дифракции (UTD) и методах трассировки лучей. Для расчета напряженности поля внутри помещений необходима

детальная информация о структуре здания. В этих моделях эмпирические элементы сочетаются с теоретическим электромагнитным подходом UTD. Этот метод учитывает прямые однократно дифрагированные и однократно отраженные лучи и может распространяться на многократную дифракцию или многократное отражение, а также на сочетание дифрагированных и отраженных лучей. За счет включения отраженных и дифрагированных лучей точность прогнозирования основных потерь передачи существенно повышается.

В случае использования направленной антенны основные потери передачи внутри помещения характеризуются как средними основными потерями передачи, так и связанной с ними статистикой замираний вследствие затенения. Несколько моделей основных потерь передачи внутри помещения учитывают ослабление сигнала при его многократном прохождении через стены и/или полы. Модель учитывает потери при многократном прохождении сигнала через пол, что позволяет предусмотреть такие характеристики, как повторное использование частоты на различных этажах здания. Дистанционные коэффициенты потери мощности, приводимые ниже, включают в неявном виде поправку на потери при прохождении сигнала через стены и над или через препятствия, а также на остальные механизмы возникновения потерь, которые могут возникнуть в пределах одного этажа здания. Однородная теория дифракции (UTD) и методы трассировки лучей предоставляют возможность в явном виде учитывать потери за счет каждой стены, вместо того чтобы включать их в дистанционную модель.

Основная модель потерь имеет следующий вид:

$$L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n), \quad (2)$$

где:

- N : дистанционный коэффициент потерь мощности;
- f : частота (МГц);
- d : расстояние разнесения (м) между базовой станцией и переносным терминалом (где $d > 1$ м);
- d_o : эталонное расстояние (м);
- $L(d_o)$: основные потери передачи в d_o (дБ) для эталонного расстояния d_o на 1 м и принимая распространение в свободном пространстве $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$, где f выражается в мегагерцах (МГц);
- L_f : коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через пол (дБ);
- n : количество этажей между базовой станцией и переносным терминалом ($n \geq 0$), $L_f = 0$ дБ при $n = 0$.

Типовые параметры, основанные на результатах различных измерений, приведены в таблицах 3 и 4. В конце раздела приведены дополнительные общие руководящие указания.

ТАБЛИЦА 3

Коэффициенты потери мощности N , используемые при расчете потерь передачи внутри помещения

Частота (ГГц)	Службное помещение	Помещение торгового назначения	Завод	Коридор	ЦОД
12,65–14,15		–	19,5 ^(8, 13) 39,3 ^(8, 13)	18,3 ^(2, 8, 13) 44,5 ^(2, 8, 13)	–
25,3–28,3		–	19,0 ^(8, 13) 37,8 ^(8, 13)	19,2 ^(2, 8, 13) 37,7 ^(2, 8, 13)	–
28		27,6 ⁽⁴⁾ 17,9 ^(8, 9) 24,8 ^(8, 9)	–	–	–

ТАБЛИЦА 3 (окончание)

Частота (ГГц)	Служебное помещение	Помещение торгового назначения	Завод	Коридор	ЦОД
38		18,6 ^(8,9) 25,9 ^(8,9)	–	–	–
51–57	15 ⁽⁶⁾	–	–	13 ⁽⁶⁾ 16,3 ^(2,6)	–
60	–	–	–	16 ^(1,3,5)	–
67–73	19 ⁽⁷⁾	–	18,3 ^(8,13) 38,8 ^(8,13)	18,8 ^(2,8,13) 35,1 ^(2,8,13)	–
250	20,1 ⁽¹¹⁾	–	–	19,0 ^(5,11)	–
275	20 ⁽¹¹⁾	–	–	19,2 ^(5,11)	–
300	20 ⁽¹⁰⁾	–	–	19,5 ^(5,10)	20,2 ⁽¹⁰⁾
325	19,8 ⁽¹²⁾	–	–	19,6 ^(5,12)	–
340	20,8 ^(5,14)	–	–	19,9 ^(5,14)	–
410	20,6 ^(5,11)	–	–	20,1 ^(5,11)	–

- (1) Подразумевается, что на частотах 60 ГГц и 70 ГГц происходит распространение в пределах одной комнаты или помещения, при этом поправки на передачу при прохождении сигнала через стены не учитываются. Поглощение в газах на частоте около 60 ГГц также весьма существенно для расстояний более 100 м и может влиять на расстояния повторного использования частот (см, Рекомендацию МСЭ-R P.676).
- (2) Компьютерный зал, в котором установлено большое число компьютеров.
- (3) Ширина луча передающей и приемной антенны составляет 15,4°.
- (4) Железнодорожный вокзал (170 м × 45 м × 21 м (В)) и здание аэропорта (650 м × 82 м × 20 м (В)) – случай NLoS, антенна передатчика с шириной луча 60° по уровню половинной мощности установлена на высоте 8 м, и антенна приемника с шириной луча 10° установлена на высоте 1,5 м над полом. Это значение было получено на основании максимального усиления на трассе антенн передатчика и приемника разной ориентации.
- (5) Передатчик и приемник находятся в коридоре LoS.
- (6) Ширина луча передающей антенны 56,3°, синтез на 360° по азимуту на уровне приемника с шириной луча 19,7° по углу места.
- (7) Ширина луча передающей антенны 40°, синтез на 360° по азимуту на уровне приемника с шириной луча 14,4° по углу места.
- (8) Верхнее число соответствует случаям LoS, а нижнее – NLoS.
- (9) Условия те же, что и для (8), передающая антенна с шириной луча 60° установлена на высоте 8 м, а приемник с всенаправленной антенной – на высоте 1,5 м.
- (10) Ширина луча передающей и приемной антенн составляет 10°.
- (11) Ширина луча передающей и приемной антенн составляет 8°.
- (12) Ширина луча передающей и приемной антенн составляет 7°.
- (13) Ширина луча передатчика составляет 18°, приемник – всенаправленный.
- (14) Ширина луча передающей и приемной антенн составляет 9°.

ТАБЛИЦА 4

Коэффициенты потерь при прохождении сигнала через пол L_f (дБ), где n – число пройденных этажей, используемые при расчете потерь передачи внутри помещения ($n \geq 1$)

Частота (ГГц)	Жилое помещение	Службное помещение	Помещение торгового назначения
0,9	–	9 (1 этаж) 19 (2 этажа) 24 (3 этажа)	–
1,8–2	$4n$	$15 + 4(n - 1)$	$6 + 3(n - 1)$
2,4	10 ⁽¹⁾ (многоквартирное здание) 5 (дом)	14	–
3,5	–	18 (1 этаж) 26 (2 этажа)	–
5,2	13 ⁽¹⁾ (многоквартирное здание) 7 ⁽²⁾ (дом)	16 (1 этаж)	–
5,8	–	22 (1 этаж) 28 (2 этажа)	–

(1) На одну бетонную стену.

(2) Деревянный наполнитель.

Для различных диапазонов частот, для которых коэффициент потери мощности в жилых помещениях не установлен, можно использовать соответствующее значение этого коэффициента для служебных помещений.

Следует отметить, что могут существовать ограничения на изоляцию, предполагаемую при прохождении сигналов между этажами. Сигнал может найти другие, внешние пути для завершения линии связи с меньшими общими потерями, чем при многократном пересечении перекрытий между этажами.

Если эти внешние пути исключить, то измерения на частоте 5,2 ГГц показали, что при нормальном падении радиоволн средние дополнительные потери при прохождении типовых междуэтажных железобетонных перекрытий с подвесными потолками составляют 20 дБ при стандартном отклонении 1,5 дБ. Осветительные приборы увеличивают средние потери до 30 дБ при стандартном отклонении 3 дБ, а вентиляционные каналы под полом увеличивают средние потери до 36 дБ при стандартном отклонении 5 дБ. Эти значения должны использоваться вместо коэффициентов L_f в моделях, зависящих от места, таких как связанных с построением лучей.

Статистика замираний, вызванных затенением внутри помещений, соответствует лог-нормальному закону, а значения стандартных отклонений (дБ) приведены в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5

**Статистика замираний вследствие затенения, стандартное отклонение (дБ),
для расчета потерь передачи внутри помещения**

Частота (ГГц)	Служебное помещение	Помещение торгового назначения	Завод	Коридор
12,65–14,15	–	–	1,7 ^(2, 5) 1,4 ^(2, 5)	2,5 ^(2, 5) 1,8 ^(2, 5)
25,3–28,3	–	–	1,4 ^(2, 5) 1,7 ^(2, 5)	12,5 ^(2, 5) 1,3 ^(2, 5)
26	2,8 ⁽⁴⁾	–		
28	3,4 ⁽²⁾ 6,6 ⁽²⁾	6,7 ⁽¹⁾ 1,4 ^(2, 3) 6,4 ^(2, 3)		
38	4,6 ⁽²⁾ 6,8 ⁽²⁾	1,6 ^(2, 3) 5,5 ^(2, 3)		
51–57	2,7	–		
67–73	2,1	–	1,3 ^(2, 5) 1,6 ^(2, 5)	2,1 ^(2, 5) 2,5 ^(2, 5)

- (1) Железнодорожный вокзал (170 м × 45 м × 21 м (В)) и здание аэропорта (650 м × 82 м × 20 м (В)) – случай NLoS, антенна передатчика с шириной луча 60° по уровню половинной мощности установлена на высоте 8 м, и антенна приемника с шириной луча 10° установлена на высоте 1,5 м над полом. Это значение было получено на основании максимального усиления на трассе антенн передатчика и приемника разной ориентации.
- (2) Верхнее число соответствует случаям LoS, а нижнее – NLoS.
- (3) Условия те же, что и для (1), передающая антенна с шириной луча 60° установлена на высоте 8 м, а приемник со всенаправленной антенной – на высоте 1,5 м.
- (4) Открытое служебное помещение (50 м × 16 м × 2,7 м (В)) – случай LoS. Усредненные результаты для высоты установки передающей антенны 2,6 м и 1,2 м. Высота установки приемной антенны составляла 1,5 м. Передающая и приемная антенны – всенаправленные.
- (5) Ширина луча передатчика составляет 18°, приемник – всенаправленный.

Хотя имеющиеся в настоящее время результаты измерений были получены в разных условиях, что делает затруднительным их прямое сравнение, и данные поступили только для отдельных диапазонов частот, некоторые общие заключения все же можно вывести, особенно для диапазона 900–2000 МГц.

- На трассах с компонентой прямой видимости (LoS) доминируют потери передачи в свободном пространстве, а дистанционный коэффициент потери мощности для них равняется примерно 20.
- Для больших открытых помещений также характерно значение дистанционного коэффициента потери мощности порядка 20; это может объясняться наличием мощной составляющей LoS в большинстве зон помещения. Примерами могут служить помещения, расположенные в больших торговых складах, спортивные арены, заводские и служебные помещения открытой планировки.
- В коридорах отмечаются меньшие основные потери передачи, чем в свободном пространстве, с типовым дистанционным коэффициентом потери мощности порядка 18. Продовольственные магазины с их длинными линейными проходами между стеллажами имеют характеристики потерь, соответствующие коридорам.
- Распространение огибанием препятствий и через стены ведет к значительным дополнительным потерям, которые в обычных условиях могут увеличить дистанционный коэффициент потерь мощности до 40. Примерами могут служить трассы между комнатами в служебных помещениях закрытой планировки.

- На длинных трассах без препятствий в первой зоне Френеля может возникнуть точка излома кривой. На этом расстоянии дистанционный коэффициент потери мощности может меняться примерно от 20 до 40.
- Уменьшение коэффициента основных потерь передачи при увеличении частоты для условий приема в служебных помещениях (таблица 2) не всегда очевидно или легко объяснимо. С одной стороны, при увеличении частоты потери при прохождении сквозь препятствия (например, стены, мебель) возрастают, и дифрагированные сигналы дают меньший вклад в мощность принимаемого сигнала; с другой стороны, зона Френеля менее закрыта на более высоких частотах, что приводит к меньшим потерям. Фактические основные потери передачи зависят от этих противоположно действующих механизмов.

4 Модели разброса задержки

4.1 Многолучевость

Радиоканал распространения волн для подвижной/переносной станции меняется в зависимости от времени, частоты и местоположения в пространстве. Даже в статической ситуации, когда положение передатчика и приемника зафиксированы, для такого канала характерна определенная динамика, поскольку рассеивающие и отражающие предметы могут перемещаться. Термин "многолучевость" обусловлен тем, что вследствие отражения, дифракции и рассеяния радиоволны могут распространяться от передатчика к приемнику по многочисленным трассам. Для каждой из этих трасс характерна своя временная задержка, пропорциональная длине трассы. (Весьма грубую оценку ожидаемого максимального времени задержки для конкретных окружающих условий можно получить, зная размеры помещения и учитывая тот факт, что время (в наносекундах) для прохождения радиоимпульсом расстояния d (м) равно примерно $3,3 d$.) Эти сигналы с задержкой, каждый из которых имеет свою амплитуду, образуют линейный фильтр с меняющимися во времени характеристиками.

4.2 Импульсная характеристика

Цель моделирования канала заключается в том, чтобы обеспечить точное математическое описание явления распространения радиоволн, которое можно было бы использовать при имитации радиолиний и систем в процессе моделирования развертывания системы. Поскольку радиоканал линейен, он полностью описывается своей импульсной характеристикой. Если же импульсная характеристика известна, то можно определить реакцию радиоканала на любой входной сигнал. Это и есть основа для имитационного моделирования характеристик линии.

Импульсная характеристика обычно представляется в виде функциональной зависимости плотности мощности от дополнительной задержки по отношению к первому обнаруженному сигналу. Эту зависимость часто называют профилем задержки мощности. Соответствующий пример показан на рисунке 1 Рекомендации МСЭ-R P.1407, только временная шкала для каналов внутри помещения должна измеряться не в микросекундах, а в наносекундах. В этой же Рекомендации приводятся определения нескольких параметров, характеризующих профили импульсной характеристики.

Импульсная характеристика канала меняется в зависимости от местоположения приемника, а также может меняться и во времени. Поэтому она обычно измеряется и представляется в качестве среднего значения профилей, полученного в результате измерений для одной длины волны, если необходимо уменьшить влияние шумов, или для нескольких длин волн, если требуется определить средний пространственный профиль. Очень важно четко определить, какой именно средний профиль имеется в виду и как производилось усреднение. Рекомендуемая процедура усреднения заключается в том, чтобы следующим образом сформировать статистическую модель: для оценки каждой импульсной характеристики (профиля задержки мощности) установить отрезки времени до и после средней задержки T_D , (см. Рекомендацию МСЭ-R P.1407), за пределами которых плотность мощности не превышает заданные значения (-10 , -15 , -20 , -25 , -30 дБ), установленные относительно пикового значения плотности мощности. Медиана и, при желании, 90-я перцентиль распределений этих отрезков времени и представляют собой искомую модель.

4.3 Среднеквадратичное значение разброса задержки

Профили задержки мощности, как говорилось выше, часто характеризуются одним или несколькими параметрами. Эти параметры вычисляются по профилям, усредненным по поверхности, имеющей размеры порядка нескольких длин волн. (Параметр среднеквадратичного значения разброса задержки иногда определяют по индивидуальным профилям, а результаты усредняют, однако в этом случае окончательный результат будет, как правило, отличаться от значения, полученного с помощью усредненного профиля.) Порог исключения шума, или критерий приемки, например величина на 30 дБ ниже пикового значения профиля, должен указываться вместе с результирующим значением разброса задержки, которое зависит от величины порога.

Поскольку среднеквадратичное значение разброса задержки очень широко используется, оно не всегда дает полное описание профиля задержек. В случае многолучевости, когда разброс задержки превышает длительность символа, коэффициент ошибок по битам для модуляции с фазовой манипуляцией зависит не только от среднеквадратичного значения разброса задержки, но и от отношения принимаемых мощностей полезного и мешающего сигналов. Это особенно заметно в системах с высокой скоростью передачи символов, но остается справедливым и при низких скоростях их передачи, когда среди многолучевых составляющих имеется мощный доминирующий сигнал (замирание Райса).

Тем не менее, если предположить, что профиль затухает по экспоненте, то достаточно использовать среднеквадратичное значение разброса задержки вместо профиля задержки мощности. В этом случае импульсная характеристика может быть преобразована примерно следующим образом:

$$h(t) = \begin{cases} e^{-t/S} & \text{при } 0 \leq t \leq t_{max} \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

где:

S : среднеквадратичное значение разброса задержки;

t_{max} : максимальная задержка;

$t_{max} \gg S$.

Преимущество использования среднеквадратичного значения разброса задержки в качестве выходного параметра модели заключается в том, что такую модель можно представить просто в виде таблицы. Типовые значения параметра разброса задержки, полученные с помощью усредненных профилей задержки для трех видов помещений, представлены в таблице 6. В столбце В таблицы 6 представлены наиболее часто встречающиеся медианные значения, столбцы А и С соответствуют 10% и 90% значений интегральной функции распределения. Значения, приведенные в таблице, характерны для максимального размера вероятных помещений каждого типа.

ТАБЛИЦА 6

Среднеквадратичные значения параметра разброса задержки

Частота (ГГц)	Условия приема	Поляризация	Разрешение по времени задержки (нс)	Ширина передающего луча (град.)	Ширина приемного луча (град.)	А (нс)	В (нс)	С (нс)	Примечание для А, В, С
1,9	Жилое помещение	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	20	70	150	–
	Службное помещение	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	35	100	460	–
	Помещение торгового назначения	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	55	150	500	–
2,25	ТВ-студия	VV	4,2	Всенапр.	Всенапр.	–	13 26	–	(3)

ТАБЛИЦА 6 (продолжение)

Частота (ГГц)	Условия приема	Поляризация	Разрешение по времени задержки (нс)	Ширина передающего луча (град.)	Ширина приемного луча (град.)	А (нс)	В (нс)	С (нс)	Примечание для А, В, С
2,625	Службное помещение	VV	1,8	Всенапр.	Всенапр.	8	11	12,5	(1)
		VV	1,8	Всенапр.	Всенапр.	10,74	13,74	20,15	(2)
	Коридор	VV	1,8	Всенапр.	Всенапр.	8,49	18,53	25,16	–
	Кабина самолета	VV	1,8	Всенапр.	Всенапр.	7,98	11,89	14,47	–
	Завод	VV	1,8	Всенапр.	Всенапр.	51,5	69,2	87,2	–
3,7	Жилое помещение	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	15	22	27	–
	Службное помещение	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	30	38	45	–
	Помещение торгового назначения	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	105	145	170	–
5,2	Жилое помещение	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	17	23	30	–
	Службное помещение	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	38	60	110	–
	Помещение торгового назначения	VV	10	Всенапр.	Всенапр.	135	190	205	–
12,65–14,15	Завод	VV	1	18	Всенапр.	2,9 7,5	4,9 21,6	16,7 26,4	(3)
	Компьютерный кластер	VV	1	18	Всенапр.	1,2 7,6	2,8 14,3	8,7 22,9	(3)
25,3–28,3	Завод	VV	0,5	18	Всенапр.	4,9 5,1	7,7 17,2	12,1 29,8	(3)
	Компьютерный кластер	VV	0,5	18	Всенапр.	0,9 8,4	14,8 16,9	26,2 23,1	(3)
28	Помещение торгового назначения	VV	2	60	Всенапр.	17 36	34 65	64 86	(3, 5)
29,3–31,5	Компьютерный кластер	Двойная ⁽⁴⁾	0,45	35	35	1,2	2,5	14	(5)
			0,45	35	35	1,6	17,6	34	(7)
38	Помещение торгового назначения	VV	2	40	Всенапр.	4 42	26 69	55 82	(3, 5)
51–57	Компьютерный кластер	VV/HH	0,5	56,3	18,4	0,69	0,96	2,89	(5)
					18,4	2,14	10,7	29,7	(5, 12)
	Службное помещение/ классная комната	VV/HH	0,5	56,3	18,4	0,56	0,65	4,29	(5)
					18,4	1,6	15,8	26,7	(5, 12)
	Коридор	VV/HH	0,5	56,3	18,4	0,54	0,72	1,34	(5)
					18,4	0,81	8,9	44,6	(5, 12)
58,7–63,1	Компьютерный кластер	VV	0,22	15,4	15,4	1,0	5,2	10,6	(8)
		VV	0,9	15,4	2,2	1,2	12	37,5	(9)
	Службное помещение ⁽⁶⁾	VV	0,22	Всенапр.	Всенапр.	0,68	1,7	4	(10)
		VV	0,22	Всенапр.	Всенапр.	0,45	1,77	5,2	(11)

ТАБЛИЦА 6 (окончание)

Частота (ГГц)	Условия приема	Поляризация	Разрешение по времени задержки (нс)	Ширина передающего луча (град.)	Ширина приемного луча (град.)	А (нс)	В (нс)	С (нс)	Примечание для А, В, С
67–73	Компьютерный кластер	VV/HH	0,5	40	14,4	0,3 6	0,5 7	2,4	(5)
					14,4	1,1	10, 9	28, 1	(5, 12)
	Службное помещение/ классная комната	VV/HH	0,5	40	14,4	0,3 3	0,5	6,3 9	(5)
					14,4	1,5 9	12, 6	25, 9	(5, 12)
	Коридор	VV/HH	0,5	40	14,4	0,3 6	0,4 7	1,2	(5)
					14,4	0,4 9	6,1 1	35, 2	(5, 12)
	Завод	VV	0,5	18	Всенапр.	0,6 3,9	1,8 10, 2	8,2 26, 4	(3,5)
	Компьютерный кластер	VV	0,5	18	Всенапр.	6,5 6,6	10, 1 13, 8	17, 1 24, 1	(3,5)

(1) Антенны передатчика и приемника установлены на высоте потолка 2,6 м и (2) на уровне стола на высоте 1,5 м.

(3) Верхние и нижние значения представляют случай LoS и NLoS соответственно.

(4) Среднее значение VV, VH, HV и HH.

(5) Порог 20 дБ⁽⁶⁾, 25 дБ⁽⁷⁾ и 30 дБ.

(8) Порог 30 дБ, приемник направлена на передатчик.

(9) Порог 20 дБ, антенна передатчика поворачивается на 360°.

(10) Передатчик и приемник: передача на теле – на теле⁽¹¹⁾ и на теле – вне тела.

(12) Приемная антенна вращалась на 360° шагами по 5°. Когда приемная антенна не наведена на передатчик, значение соответствует разбросу задержки, зависящему от направления.

В пределах конкретного здания разброс задержки, как правило, увеличивается при увеличении расстояния между антеннами и, следовательно, при возрастании основных потерь передачи. Чем больше расстояние между антеннами, тем больше вероятность того, что на трассе возникнут препятствия и что принимаемый сигнал будет целиком состоять из рассеянных сигналов.

Среднеквадратичный разброс задержки S в грубом приближении пропорционален площади поверхности пола F_s и определяется уравнением (4):

$$10 \log S = 2,3 \log(F_s) + 11,0, \quad (4)$$

где единицы F_s и S выражены соответственно в м² и нс.

Это уравнение основано на измерениях в диапазоне 2 ГГц для различных типов помещений, таких как служебные помещения, вестибюли, коридоры и гимнастические залы. Максимальная площадь пола для проведения измерения составляла 1000 м². Медианное значение погрешности оценки составляет – 1,6 нс, а стандартное отклонение 24,3 нс.

Если разброс задержки S представлен в дБ, то стандартное отклонение S определяется в диапазоне от примерно 0,7 дБ до 1,2 дБ.

4.4 Статистика избирательности по частоте

Многолучевое распространение обуславливает избирательность по частоте. Степень избирательности по частоте характеризуется когерентной полосой пропускания, средней шириной полосы замирания и частотой пересечения уровня, как подробно описано в Рекомендации МСЭ-R P.1407. Значения средней ширины полосы замирания, которые оказались ниже порога 6 дБ по результатам измерений внутри помещений, представляющих лабораторию и служебное помещение в полосе 2,38 ГГц, и ТВ-студию в полосе 2,25 ГГц, составляют 27% и 21% соответственно. Соответствующие значения частоты пересечения уровня составляют 0,12 на МГц и 0,24 на МГц.

4.5 Модели, учитывающие особенности места

В то время как статистические модели весьма полезны в качестве руководства при планировании, детерминированные (или учитывающие особенности места) модели особенно ценны для тех, кто занимается проектированием систем. Можно выделить несколько методов разработки детерминированных моделей распределения. Для применений внутри помещений были изучены, в частности, метод конечных разностей во временной области (FDTD) и метод, основанный на геометрической оптике. Метод геометрической оптики более эффективен в отношении вычислений, чем FDTD.

В методе, основанном на геометрической оптике, существуют два основных подхода – использование изображений и возбуждение луча. В методе изображений используются изображения приемника по отношению ко всем отражающим поверхностям окружающей среды. Рассчитываются координаты всех изображений, а затем определяются траектории лучей по направлению к этим изображениям.

Подход с возбуждением луча предполагает равномерное распределение ряда возбужденных лучей в пространстве вокруг передающей антенны. Траектория каждого луча прослеживается до тех пор, пока он не достигнет приемника или его амплитуда не упадет ниже заданного уровня. Сравнение подхода с возбуждением луча и подхода с использованием изображений показывает, что первый метод более гибкий, поскольку дифрагированные и рассеянные лучи можно рассматривать вместе с зеркально отраженными. Далее, используя метод расщепления луча или вариационный метод, можно сократить время расчетов, сохранив при этом требуемое разрешение. Метод возбуждения луча подходит для прогнозирования импульсной характеристики канала, обслуживающего обширную зону, тогда как метод изображений хорош для прогнозов в случае связи пункта с пунктом.

Детерминированные модели, как правило, основаны на ряде предположений о влиянии строительных материалов здания на характеристики распространения на рассматриваемой частоте. (См. пункт 7 о свойствах строительных материалов.) Модель, учитывающая особенности места, должна учитывать и геометрию помещения, отражение, дифракцию, и передачу сигнала через стены. Импульсную характеристику в заданной точке можно представить следующим образом:

$$h(t) = \sum_{n=1}^N \left[\left(\prod_{u=1}^{M_n} \Gamma_{nu} \times \prod_{v=1}^{M_{pn}} P_{nv} \right) \frac{1}{r_n} \cdot e^{-j\omega \tau_n} \cdot \delta(t - \tau_n) \right], \quad (5)$$

где:

- $h(t)$: импульсная характеристика;
- N : число падающих лучей;
- M_{rn} : число отражений n -го луча;
- M_{pn} : число проникновений n -го луча;
- Γ_{nu} : коэффициент отражения n -го луча от u -й стены;
- P_{nv} : коэффициент проникновения n -го луча через v -ю стену;
- r_n : длина трассы n -го луча;
- τ_n : задержка n -го луча.

Траектории лучей, отраженных от стен и других поверхностей или проникших сквозь них, рассчитываются с помощью уравнений Френеля. Следовательно, комплексная диэлектрическая проницаемость строительных материалов здания должна быть исходным параметром. Измеренные значения диэлектрической проницаемости некоторых строительных материалов приведены в пункте 7.

Для адекватного описания принимаемого сигнала, в модель, помимо отраженных и проникших сквозь стену лучей, которые присутствуют в уравнении (5), должны быть включены дифрагированные и рассеянные лучи. В частности это относится к случаю работы в таких помещениях, как коридоры, где имеются углы, и в других аналогичных условиях распространения. Для расчета дифрагированных лучей можно использовать однородную теорию дифракции (UTD).

5 Влияние поляризации

В условиях приема внутри помещений существует не только прямая трасса распространения между передатчиком и приемником, но также и трассы отраженных и дифрагированных лучей. Отражательные свойства строительных материалов зависят от поляризации, угла падения волны и комплексной диэлектрической проницаемости материалов, что отражено в формуле отражения Френеля. Углы прихода многолучевых составляющих распределяются в зависимости от структуры здания и местоположения передатчика и приемника. Следовательно, вид поляризации может существенно влиять на характеристики распространения внутри помещения.

5.1 Распространение в пределах прямой видимости

5.1.1 Разброс задержки

Принято считать, что для каналов прямой видимости (LoS) направленные антенны уменьшают среднее квадратичное значение разброса задержки по сравнению с всенаправленными и что круговая поляризация (CP) также уменьшает их по сравнению с линейной поляризацией (LP). Следовательно, в данном случае направленная антенна с круговой поляризацией может служить эффективным средством уменьшения разброса задержки.

Основной механизм зависимости задержки от поляризации, может быть связан с тем фактом, что когда сигнал с круговой поляризацией падает на отражающую поверхность под углом, меньшим угла Брюстера, обычное направление отраженного луча круговой поляризации меняется на обратное. Изменение направления луча с круговой поляризацией на обратное при каждом отражении означает, что приходящие после однократного отражения многолучевые составляющие ортогонально поляризованы по отношению к компоненте LoS; это позволяет исключить значительную часть помех, обусловленных многолучевостью. Данное явление не зависит от частоты, что было предсказано теоретически и подтверждено экспериментами по распространению, проведенными внутри помещений в диапазоне частот 1,3–60 ГГц. Данное утверждение справедливо как для систем связи внутри помещения, так и для наружных систем. Поскольку для всех существующих строительных материалов угол Брюстера превышает 45 градусов, многолучевость за счет однократного отражения (то есть основной источник многолучевых составляющих) эффективно подавляется в большинстве помещений независимо от характера интерьера и конструктивных материалов помещения. Возможное исключение составляют помещения, такие как длинные коридоры, в которых очень большие углы падения доминируют над многолучевостью. Изменение среднее квадратичного значения разброса задержки на линиях подвижной связи также уменьшается, когда используются антенны с круговой поляризацией.

5.1.2 Степень избирательности по кроссполяризации (XPR)

Компоненты сигнала, обусловленные кроссполяризацией, возникают в результате отражения и дифракции. Общеизвестно, что характеристика корреляции замираний между ортогонально поляризованными антеннами имеет очень низкий коэффициент корреляции. Разработаны методы разнесения по поляризации и системы с множеством входов и выходов (MIMO) с ортогонально поляризованными антеннами, в которых используется эта характеристика замираний. Использование метода разнесения по поляризации является одним из решений для увеличения мощности принимаемого сигнала, а действие метода в значительной степени зависит от характеристики XPR.

Кроме того, емкость канала может быть увеличена соответствующим использованием компонентов кроссполяризации в системах ММО. Таким образом, качество связи может быть улучшено путем эффективного использования информации относительно кроссполяризованных волн в беспроводной системе.

В таблице 7 представлены результаты измерений для медианы и среднего значения XPR для всех типов условий.

ТАБЛИЦА 7
Примеры значений XPR

Частота (ГГц)	Условия	Конфигурация антенны	XPR (дБ)	Замечания
5,2	Службное помещение	Случай 1	Нет данных	Измерение
		Случай 2	6,39 (медиана) 6,55 (среднее значение)	
		Случай 3	4,74 (медиана) 4,38 (среднее значение)	
	Зал заседаний	Случай 1	8,36 (медиана) 7,83 (среднее значение)	
		Случай 2	6,68 (медиана) 6,33 (среднее значение)	
		Случай 3	Нет данных	

Случай 1. Передающая и приемная антенны установлены на высоте, превышающей высоту препятствий.

Случай 2. Передающая антенна установлена на высоте, превышающей высоту препятствий, а приемная антенна установлена на высоте, соответствующей высоте препятствий.

Случай 3. Передающая и приемная антенны установлены на высоте, соответствующей высоте препятствий.

5.2 Препятствия на трассе

Если на прямой трассе имеются препятствия, зависимость разброса задержки от поляризации и направленности антенны может оказаться более сложной, чем для трасс прямой видимости. Имеются немногочисленные результаты экспериментов на трассах с препятствиями. Вместе с тем экспериментальный результат, полученный на частоте 2,4 ГГц, позволяет предположить, что зависимость разброса задержки от поляризации и направленности антенны для трасс с препятствиями имеет более сложный характер, чем для трасс прямой видимости. Например, сочетание всенаправленной горизонтально поляризованной антенны передатчика и направленной антенны приемника с круговой поляризацией дает наименьшее значение среднеквадратичного разброса задержки и наименьшее максимальное значение избыточной задержки на трассе с препятствиями.

5.3 Ориентация мобильного терминала

В среде приема на портативные радиоустройства основными механизмами распространения сигнала являются его отражение и рассеяние. Поляризация передаваемого сигнала в результате рассеяния энергии часто преобразуется в ортогональную. В этих условиях возникновение связи за счет кроссполяризации увеличивает вероятность того, что уровни принимаемых сигналов с портативных радиостанций, ориентированных случайным образом, окажутся одинаковыми. Измерение связи за счет кроссполяризации, проведенное на частоте 816 МГц, показало высокую степень такой связи.

6 Влияние диаграммы направленности антенны

Ожидается, что в радиосистемах, работающих в диапазоне миллиметровых волн, будут использоваться направленные антенны и/или различные методы формирования луча с использованием нескольких антенных решеток для преодоления относительно высоких основных потерь передачи и установления надежных линий связи. Необходимо изучить влияние ширины луча антенны на характеристики распространения радиоволн.

6.1 Потери принимаемой мощности в зависимости от ширины луча направленной антенны

При приеме сигналов на антенну, луч которой имеет определенную ширину, количество компонентов многолучевого сигнала уменьшается по сравнению с сигналом на всенаправленной приемной антенне. Это приводит к дополнительным потерям мощности, которые можно рассчитать следующим образом:

$$L^{\text{beamforming}}(d, f, W_{\phi}) = L^{\text{omni}}(d, f) + \Delta L(W_{\phi}) \text{ (дБ)}, \quad (6)$$

где L^{omni} – означает основные потери передачи в случае всенаправленной антенны в уравнении (1), а ΔL рассчитывается следующим образом:

$$\Delta L(W_{\phi}) = \eta \left(\frac{1}{W_{\phi}} - \frac{1}{360^{\circ}} \right), \quad 10^{\circ} \leq W_{\phi} \leq 360^{\circ}, \quad (7)$$

где W_{ϕ} – ширина луча по уровню половинной мощности (НРВW) направленной антенны (формирование луча). В таблице 8 приведены значения η , полученные при измерениях на частотах 28 ГГц и 38 ГГц в условиях внутри помещения торгового назначения.

ТАБЛИЦА 8

Постоянная η для дополнительных потерь мощности в зависимости от ширины луча W_{ϕ} при формировании луча

Условия	Частота (ГГц)	Тип линии	η
Помещение торгового назначения	28	LoS	28,46
		NLoS	70,54
	38	LoS	26,66
		NLoS	76,77

6.2 Характеристики разброса задержки и углового разброса

Поскольку многолучевые составляющие распространения распределены в зависимости от угла прихода, эти составляющие за пределами ширины луча антенны подвергаются пространственной фильтрации за счет использования направленной антенны, так что разброс задержки и угловой разброс можно уменьшить. Измерение параметров распространения внутри помещения, а также имитация траекторий луча на частоте 60 ГГц при использовании всенаправленной передающей антенны и приемных антенн четырех различных типов (всенаправленная, с широким лучом, стандартная рупорная и с узким лучом), направленных в сторону передающей антенны, показывают, что подавление составляющих с задержкой эффективнее осуществляется с помощью более узких значений ширины луча. В таблице 9 приведен пример зависимости статического среднеквадратичного разброса задержки при использовании направленности антенны, не превышаемых на уровне 90-й перцентиля, полученный в результате имитаций траекторий луча на частоте 60 ГГц в пустом служебном помещении. Можно заметить, что уменьшение среднеквадратичного значения разброса задержки не всегда является желательным, поскольку при этом могут увеличиваться динамические диапазоны замираний широкополосного сигнала в результате недостаточного разнесения по частоте. Кроме того, можно заметить, что некоторые схемы передачи используют преимущества многолучевого распространения.

ТАБЛИЦА 9

**Пример зависимости статического среднеквадратичного значения
разброса задержки от направленности антенны**

Частота (ГГц)	Антенна передатчика	Ширина луча антенны приемника (град.)	Статическое среднеквадратичное значение разброса задержки (90-я процентиль) (нс)	Размер помещения (м)	Замечания
60	Всенаправленная	Всенаправленная	17	13,5 × 7,8 Пустое служебное помещение	Траектория лучей
		60	16		
		10	5		
		5	1		
		Всенаправленная	22	13,0 × 8,6 Пустое служебное помещение	Траектория лучей вне прямой видимости
		60	21		
		10	10		
		5	6		

На основе измерений в типовых условиях служебных и торговых помещений, соответственно на частотах 28 и 38 ГГц, разработаны методы прогнозирования задержки и углового разброса по ширине луча антенны.

Для получения характеристик многолучевого распространения радиоволн для узко- и широколучевых антенн проводилось сопоставление импульсных характеристик канала, собранных путем поворота узколучевой антенны на 10°, с данными по мощности, задержке и углу.

Среднеквадратичный разброс задержки DS зависит от ширины луча по уровню половинной мощности антенны θ (град.):

$$DS(\theta) = \alpha \times \log_{10} \theta \text{ нс}, \quad (8)$$

где α – коэффициент среднеквадратичного разброса задержки, а диапазон значений θ составляет $10^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$. В таблице 10 приведены типовые значения этих коэффициентов и стандартного отклонения σ , полученные при всех условиях измерения. Коэффициенты разброса задержки соответствуют случаям, когда антенны направлены так, чтобы получить максимальную мощность приема соответственно в ситуациях LoS и NLoS.

ТАБЛИЦА 10

Типовые коэффициенты среднеквадратичного разброса задержки

Условия измерения								Коэффициенты среднеквадратичного разброса задержки					
f (ГГц)	Условия	Сценарий	h_1 (м)	h_2 (м)	Расстояние (м)	Ширина луча передающей антенны (град.)	Ширина луча приемной антенны (град.)	α	σ (нс)				
28	Железнодорожная станция	LoS	8	1,5	8–80	60	10	8,25	16,11				
		NLoS						37,54	27,22				
	Здание аэропорта	LoS			8–200			7,53	15,98				
		NLoS						63,9	96,57				
38	Железнодорожная станция	LoS	8	1,5	8–80	40	10	4,18	4,33				
		NLoS						24,85	28,48				
	Здание аэропорта	LoS			8–200			4,46	14,13				
		NLoS						54,54	80,72				
	Служебное помещение	LoS			2,5			1,2	7–24	Всенапр.	10	1,16	12
		NLoS										15,13	21,8

Среднеквадратичный разброс по углу AS зависит от ширины луча по уровню половинной мощности антенны θ (град.):

$$AS(\theta) = \alpha \times \theta^\beta \text{ град.}, \quad (9)$$

где α и β – коэффициенты среднеквадратичного разброса по углу, а диапазон значений θ составляет $10^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$. В таблице 11 приведены типовые значения этих коэффициентов и стандартного отклонения σ , полученные при всех условиях измерения. Коэффициенты разброса по углу соответствуют случаям, когда антенны направлены так, чтобы получить максимальную мощность приема соответственно в ситуациях LoS и NLoS.

ТАБЛИЦА 11

Типовые коэффициенты среднеквадратичного разброса по углу

Условия измерения								Коэффициенты среднеквадратичного разброса по углу						
f (ГГц)	Условия	Сценарий	h_1 (м)	h_2 (м)	Расстояние (м)	Ширина луча передающей антенны (град.)	Ширина луча приемной антенны (град.)	α	β	σ (град.)				
28	Железнодорожная станция	LoS	8	1,5	8–80	60	10	0,5	0,77	2,3				
		NLoS						0,25	1,0	2,32				
	Здание аэропорта	LoS			8–200			1,2	0,49	2,18				
		NLoS						0,3	0,96	3,12				
38	Железнодорожная станция	LoS	8	1,5	8–80	40	10	1,14	0,54	3,36				
		NLoS						0,16	1,1	3,24				
	Здание аэропорта	LoS			8–200			2,0	0,34	1,36				
		NLoS						0,34	0,93	2,99				
	Служебное помещение	LoS			2,5			1,2	7–24	Всенапр.	10	0,07	1,22	5,58
		NLoS										0,17	1,07	4,81

7 Влияние местоположения передатчика и приемника

Результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния местоположения передатчика и приемника на характеристики распространения внутри помещений немногочисленны. Однако, как правило, можно предположить, что базовая станция должна быть помещена как можно ближе к потолку комнаты, чтобы обеспечить максимально возможную длину трасс прямой видимости. В случае портативных терминалов позиция терминала пользователя, конечно же, будет зависеть в первую очередь от перемещения пользователя, а не от ограничений, накладываемых конструкцией системы. Однако предполагается, что для непортативных терминалов высота антенны должна быть достаточной, чтобы по мере возможности обеспечить прямую видимость для базовой станции. Выбор местоположения станции также весьма ощутимо зависит от конфигурации системы, в частности от таких ее аспектов, как способы пространственного разнесения, конфигурация зоны и т. д.

8 Влияние строительных материалов, оборудования и мебели

Характеристики распространения внутри помещения зависят от отражения от строительных материалов и проникновения сигнала сквозь них. Отражательные свойства и пропускная способность материалов зависят от комплексной диэлектрической проницаемости материалов. Естественно, что в моделях прогнозирования распространения, учитывающих специфику места, в качестве основной исходной информации могут потребоваться данные о комплексной диэлектрической проницаемости строительных материалов, а также о структуре здания, и эта информация приведена в Рекомендации МСЭ-R P.2040.

Зеркальное отражение от различных материалов, из которых сделан пол, таких как половая доска и бетонные плиты, в миллиметровом диапазоне существенно уменьшается, если пол имеет ковровое покрытие с грубой поверхностью. Аналогичного уменьшения можно добиться, если закрыть окна шторами. Поэтому можно ожидать, что конкретное влияние строительных материалов будет возрастать при увеличении частоты.

Помимо структуры самого здания, предметы обстановки и арматура также сильно влияют на характеристики распространения внутри помещения. Эти предметы можно рассматривать как препятствия, а их влияние учтено в модели основных потерь передачи в пункте 3.

9 Влияние перемещения объектов по помещению

Движение людей и предметов по помещению вызывает временные изменения характеристик распространения внутри помещения. Эти изменения, однако, происходят очень медленно по сравнению с вероятной скоростью передачи данных, и поэтому фактически могут рассматриваться в качестве случайной переменной, инвариантной во времени. Кроме перемещения людей, находящихся в непосредственной близости к антеннам или на прямой трассе передачи, перемещение людей в служебных помещениях и в других местах, а также по зданию и внутри него, оказывает пренебрежимо малое воздействие на характеристики распространения.

Измерения, выполненные в условиях, когда оба терминала линии связи фиксированы, показывают, что замирания носят характер вспышки (статистика очень нестабильна) и вызываются либо возмущениями, вносимыми многолучевыми сигналами в зонах, окружающих данную линию, либо затенением, возникающим, когда люди пересекают линию передачи.

Измерения на частоте 1,7 ГГц показывают, что человек, пересекающий трассу сигнала прямой видимости, вызывает падение мощности принимаемого сигнала на 6–8 дБ, а значение параметра K в распределении Накагами-Райса при этом существенно уменьшается. Если трасса проходит за пределами прямой видимости, то движение людей около антенн не оказывает существенного влияния на характеристики канала.

В случае портативного терминала на уровень принимаемого сигнала влияет близость головы и корпуса тела пользователя. Измерения на частоте 900 МГц при использовании симметричного вибратора показывают, что уровень принимаемого сигнала уменьшается на 4–7 дБ, когда терминал находится на уровне талии человека, и на 1–2 дБ, когда пользователь держит терминал на уровне головы, по сравнению с уровнем принимаемого сигнала, когда антенна расположена на расстоянии порядка нескольких длин волн от корпуса тела человека.

Когда высота антенны ниже примерно 1 м, например в случае применения обычных настольных или портативных компьютеров, трасса прямой видимости может затеняться перемещением людей вблизи терминала пользователя. При таких применениях данных интерес представляют как глубина, так и длительность замираний. Измерения на частоте 37 ГГц в условиях приема внутри вестибюля служебного помещения показали, что часто наблюдаются замирания от 10 до 15 дБ. Продолжительность этих замираний, обусловленных затенением человеческим телом (когда люди перемещаются через линию прямой видимости постоянно и в случайном порядке), следует лог-нормальному распределению, причем значения средней продолжительности и стандартного отклонения зависят от глубины замирания. Для этих измерений при глубине замираний 10 дБ средняя продолжительность составляла 0,11 с, а стандартное отклонение – 0,47 с. При глубине замираний 15 дБ средняя продолжительность составляла 0,05 с, а стандартное отклонение – 0,15 с.

Измерения на частоте 70 ГГц показали, что значения средней продолжительности замирания, обусловленного затенением человеческим телом, составляли 0,52 с, 0,25 с и 0,09 с при глубине замираний 10 дБ, 20 дБ и 30 дБ соответственно, причем средняя скорость перемещения людей в произвольных направлениях оценивалась в 0,74 м/с, а толщина человеческого тела принималась равной 0,3 м.

Измерения показывают, что среднее число случаев затенения людьми в течение часа, вызываемого их перемещениями по служебному помещению, определяется как:

$$\bar{N} = 260 \times D_p, \quad (10)$$

где D_p ($0,05 < D_p < 0,08$) – это число людей на квадратный метр в помещении. Тогда общая длительность замираний в течение часа определяется как:

$$T = \bar{T}_s \times \bar{N}, \quad (11)$$

где \bar{T}_s – средняя длительность замирания.

Число случаев затенения людьми в течение часа в проходах выставочного зала составляло 180–280, где D_p было от 0,09 до 0,13.

Зависимость от расстояния основных потерь передачи в подземном торговом центре подвержена влиянию затенения людьми. Основные потери передачи в подземном торговом центре определяются с помощью следующего уравнения с параметрами, приведенными в таблице 12:

$$L(x) = -10 \cdot \alpha \{1,4 - \log_{10}(f) - \log_{10}(x)\} + \delta \cdot x + C \quad \text{дБ}, \quad (12)$$

где:

f : частота (МГц);

x : расстояние (м).

Параметры для случая непрямой видимости (NLoS) подтверждаются в диапазоне 5 ГГц, а параметры для случая LoS применимы к диапазону частот от 2 до 20 ГГц. Диапазон расстояний x составляет от 10 до 200 м.

Условия работы подземного торгового центра соответствуют торговому центру лестничного типа, состоящему из прямых коридоров со стеклянными или бетонными стенами. Основной коридор имеет ширину 6 м, высоту 3 м и длину 190 м. Обычные размеры человеческого тела считаются равными 170 см высотой и 45 см по ширине плеч. Плотность потока прохожих составляет приблизительно 0,008 чел./м² и 0,1 чел./м² в спокойный период (раннее утро, обычные часы) и в многолюдный период (обеденное время или час пик) соответственно.

ТАБЛИЦА 12

Параметры для моделирования функции основных потерь передачи в подземном торговом центре Йесу

	LoS			NLoS		
	α	δ (м ⁻¹)	C (дБ)	α	δ (м ⁻¹)	C (дБ)
Обычные часы	2,0	0	-5	3,4	0	-45
Час пик	2,0	0,065	-5	3,4	0,065	-45

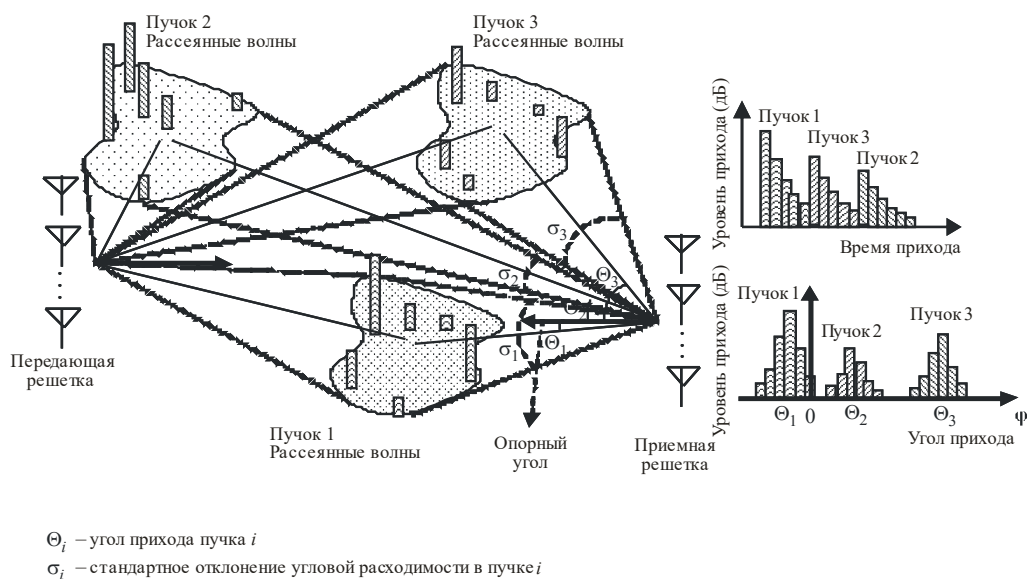
10 Модели угловой расходимости

10.1 Пучковая модель

В модели распространения радиоволн, используемой для широкополосных систем с антенными решетками, применяется пучковая модель, сочетающая как временное, так и угловое распределения. Пучок включает рассеянные волны, поступающие в приемник в течение ограниченного периода времени и под углом, как изображено на рисунке 1. Характеристики временных задержек содержатся в пункте 4 настоящей Рекомендации. Это распределение угла прихода пучка Θ_i , основанное на опорном угле (который может быть избран произвольно) для пространства внутри помещений, приблизительно выражается равномерным распределением по $[0, 2\pi]$.

РИСУНОК 1

Наглядное представление пучковой модели



P.1238-01

10.2 Угловое распределение волн прихода из i -го пучка

Функция плотности вероятности углового распределения волн прихода в пучке выражается следующим образом:

$$P_i(\varphi - \Theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_i} \cdot \exp\left(-\sqrt{2} \frac{|\varphi - \Theta_i|}{\sigma_i}\right), \quad (13)$$

где φ является углом прихода поступающих волн в пучке в градусах по отношению к опорному углу, а σ_i представляет собой стандартное отклонение углового разброса в градусах.

Параметры углового разброса в условиях помещений показаны в таблице 13.

ТАБЛИЦА 13

Параметры углового разброса в условиях помещений

	LoS		NLoS	
	Средн. (град.)	Диапазон (град.)	Средн. (град.)	Диапазон (град.)
Зал	23,7	21,8–25,6	–	–
Служебное помещение	14,8	3,93–28,8	54,0	54
Дом	21,4	6,89–36	25,5	4,27–46,8
Коридор	5	5	14,76	2–37

10.3 Двойная направленная угловая расходимость

В модели распространения радиоволн, используемой для широкополосных систем с несколькими антенными решетками в передатчике и приемнике, применяется угловое распределение на передающих и приемных станциях. В таблице 14 приведены полученные на основе измерений с шириной полосы 240 МГц на частоте 2,38 ГГц значения среднеквадратичной угловой расходимости во внутреннем коридоре и в служебном помещении для значения порога 20 дБ.

ТАБЛИЦА 14

Двойная направленная угловая расходимость

	Высота станции 1 (м)	Среднеквадратичная угловая расходимость на станции 1 (град.)	Высота станции 2 (м)	Среднеквадратичная угловая расходимость на станции 2 (град.)
Коридор и служебное помещение	1,9	68,5	1,7	69,7

11 Статистическая модель при статическом использовании

Используемые внутри помещений беспроводные терминалы, такие как сотовые телефоны и беспроводные локальные сети (WLAN), в основном находятся в статическом состоянии. Беспроводные терминалы при статическом использовании остаются неподвижными, однако среда, в которой они находятся, меняется вследствие перемещения блокирующих объектов, например людей. Для точной оценки качества связи в таких условиях мы представляем модель канала для статических условий внутри помещения, которая одновременно обеспечивает статистические характеристики как функции плотности вероятности (PDF), так и автокорреляционной функции колебания уровня принимаемого сигнала.

Рассматриваются модели канала для условий внутри помещений NLoS и LoS.

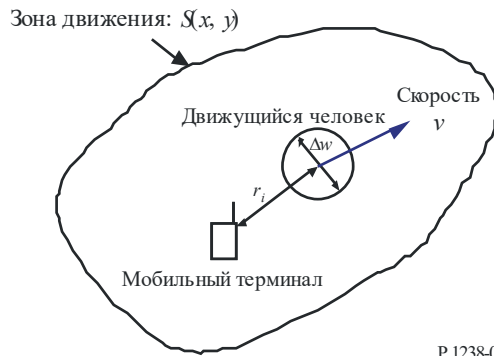
11.1 Определение

- N_{person} : число движущихся людей;
- Δw : эквивалентный диаметр движущегося человека (м);
- v : скорость движения людей (м/с);
- P_m : общая мощность многолучевого сигнала;
- $S(x, y)$: план зоны движения;
- f_T : максимальное смещение частоты для статического мобильного терминала;
- r_p : мощность принимаемого сигнала на мобильном терминале;
- f : частота (Гц);
- $p(r_p, k)$: функция плотности вероятности (PDF) мощности принимаемого сигнала, определенная как распределение Накагами-Райса с K -фактором;
- K : K -фактор, определенный в распределении Накагами-Райса;
- $R(\Delta t)$: автокорреляционная функция уровня принимаемого сигнала;
- $R_M(\Delta t)$: коэффициент автокорреляции уровня принимаемого сигнала;
- $P(f)$: энергетический спектр;
- $P_M(f)$: энергетический спектр, нормализованный по мощности $P(0)$.

11.2 Модель системы

На рисунке 2 представлена модель системы. В качестве движущихся объектов рассматриваются только люди; человек i представляется как диск с диаметром Δw (м), отстоящий от мобильного терминала (МТ) на расстоянии r_i (м). Каждый движущийся человек идет в произвольном направлении между 0 и 2π с постоянной скоростью v (м/с) и перемещается в пределах случайной области $S(x, y)$ вокруг МТ. Число движущихся людей составляет N_{person} , и любой движущийся человек поглощает часть энергии, находящейся на трассах, которые пересекает его по ширине Δw . Многолучевые сигналы поступают на терминал равномерно по всем горизонтальным направлениям. На рисунках 3 и 4 показаны типовые рассматриваемые помещения – прямоугольные и круглые соответственно.

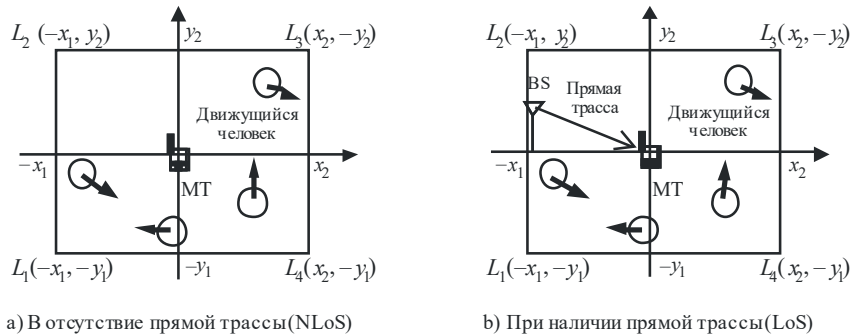
РИСУНОК 2
Модель системы



P.1238-02

РИСУНОК 3

План помещения прямоугольной формы

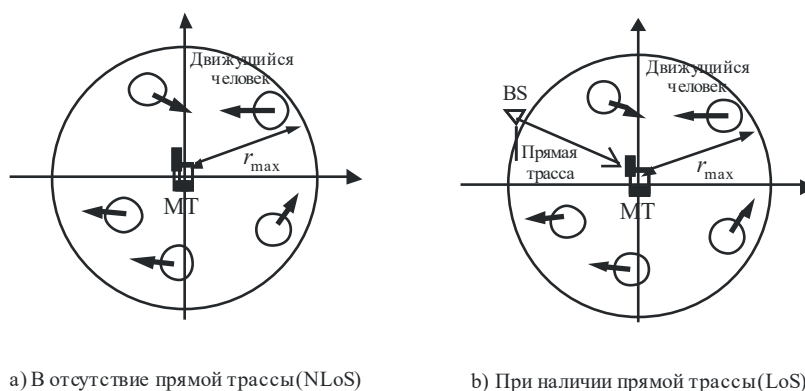


а) В отсутствие прямой трассы(NLoS)

б) При наличии прямой трассы(LoS)

P.1238-03

РИСУНОК 4
План помещения круглой формы



а) В отсутствие прямой трассы(NLoS)

б) При наличии прямой трассы(LoS)

P.1238-04

11.2.1 Функция плотности вероятности мощности принимаемого сигнала

PDF мощности принимаемого сигнала r_p на мобильном терминале определяется распределением Накагами-Райса следующим образом:

$$p(r_p, K) = (K + 1) \exp[-(K + 1)r_p - K] I_0(\sqrt{4(K + 1)Kr_p}), \quad (14)$$

где $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка, а K представляет следующий K -фактор:

$$K \equiv K(x) = \frac{|e_{Direct}(x) + e_s(x)|^2}{\left(\frac{N_{person} P_m \Delta w S_{Shape}}{2\pi}\right)}, \quad (15)$$

где:

$$S_{Shape} = \begin{cases} \frac{1}{(x_2 + x_1)(y_2 + y_1)} \begin{pmatrix} -y_1 \log(-x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2}) - x_1 \log(-y_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2}) \\ + y_1 \log(x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2}) - x_2 \log(-y_1 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2}) \\ - y_2 \log(-x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2}) + x_1 \log(y_2 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2}) \\ + y_2 \log(x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2}) + x_2 \log(y_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2}) \end{pmatrix} & \text{(для помещения прямоугольной формы)} \\ \frac{2}{r_{max}} & \text{(для помещения круглой формы)} \end{cases} \quad (16)$$

Здесь $e_{Direct}(x)$ представляет комплексную огибающую прямой трассы, а $e_s(x)$ представляет комплексную огибающую многолучевых сигналов в отсутствие движущихся объектов вокруг МТ в позиции x , которая зависит только от окружающих статических условий; их значения не зависят от времени t . P_m представляет собой общую мощность многолучевого сигнала. S_{Shape} является постоянным значением, определяемым формой и размерами помещения.

11.2.2 Автокорреляционная функция уровня принимаемого сигнала

Автокорреляционная функция $R(\Delta t)$ уровня принимаемого комплексного сигнала с учетом разновременности Δt имеет следующий вид:

$$R(\Delta t) = \begin{cases} P_m \left(\frac{|e_{Direct}(x) + e_s(x)|^2}{P_m} + \frac{N_{person} \Delta w S_{Shape}}{2\pi} \left(1 - \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} \right) \right) & (v|\Delta t| \leq \Delta w) \\ P_m \left[\frac{|e_{Direct}(x) + e_s(x)|^2}{P_m} + \frac{N_{person} \Delta w S_{Shape}}{2\pi} \left\{ 1 - \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{1}{f_T |\Delta t|} \right) + \frac{2f_T |\Delta t|}{\pi} \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{1}{f_T |\Delta t|} \right) \right) \right\} \right] & (v|\Delta t| \leq \Delta w) \end{cases}, \quad (17)$$

где:

$$f_T = v / \Delta w. \quad (18)$$

Здесь f_T определяется скоростью перемещения v и шириной Δw движущегося человека и может рассматриваться как максимальное смещение частоты для статического мобильного терминала.

11.2.3 Энергетический спектр принимаемого сигнала

Энергетический спектр $P(f)$ как функция частоты, определяющая отклонения огибающей комплексного сигнала, задается преобразованием Фурье автокорреляционной функции $R(\Delta t)$ в уравнении (17) следующим образом:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\Delta t) e^{-j2\pi f \Delta t} d\Delta t. \quad (19)$$

Энергетический спектр $P_N(f)$, нормализованный по мощности $P(0)$ на частоте $f = 0$ Гц, может быть аппроксимирован следующим образом:

$$P_N(f) = P(f) / P(0);$$

$$\approx \frac{\left(K(x) \delta(f) + 0,02 f_T^{-0,87} \times \begin{cases} \left((1 - 0,78 f_T^{-0,21}) \delta(f) + 0,78 f_T^{0,21} \exp(-5,3|f|/f_T) \right) & \left(|f| \leq \frac{f_T}{\sqrt{2}} \right) \\ 0,0092 f_T^{1,8} |f|^{-2} & \left(|f| > \frac{f_T}{\sqrt{2}} \right) \end{cases} \right)}{K(x) = 0,02 f_T^{-0,87}}. \quad (20)$$

Здесь $\delta(f)$ представляет дельта-функцию Дирака.

11.2.4 Значения

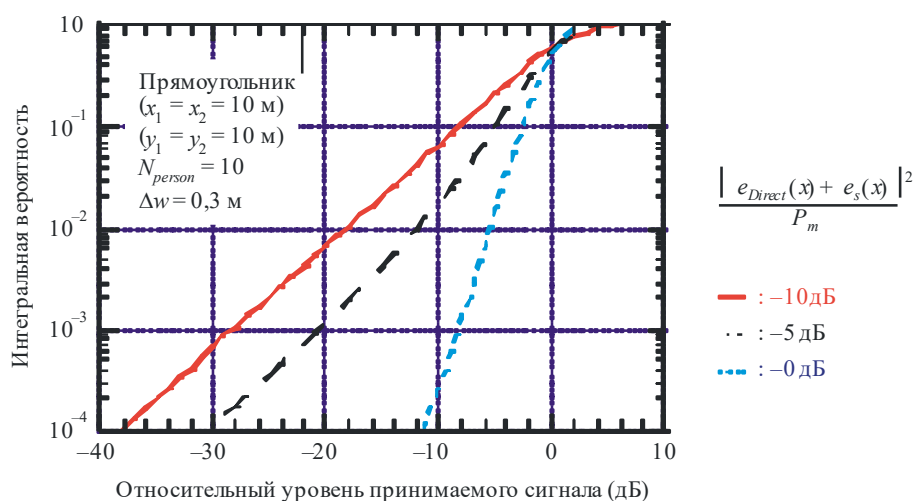
Рекомендуется установить значение Δw равным 0,3 м как представляющее взрослого человека среднего роста.

11.2.5 Примеры

PDF $p(r_p, K(x))$, автокорреляционная функция $R_N(\Delta t)$ и энергетический спектр $P_N(f)$ для случая, когда Δw , v и N_{person} равны 0,3 м, 1 м/с и 10 соответственно, а значение r_{max} установлено равным 10 м для помещения круглой формы, определенные с помощью уравнений (14), (15) и (20), показаны на рисунках 5, 6 и 7 соответственно.

РИСУНОК 5

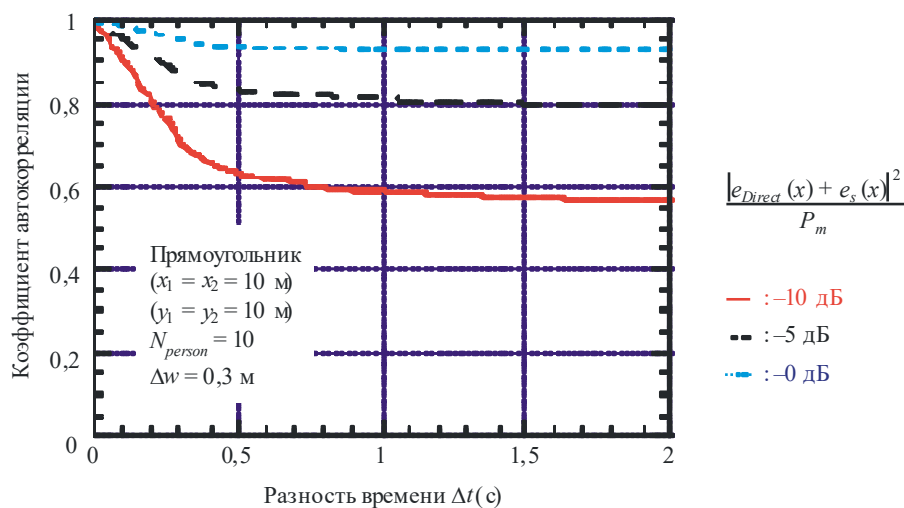
Интегральная вероятность уровня принимаемого сигнала в помещении круглой формы



P.1238-05

РИСУНОК 6

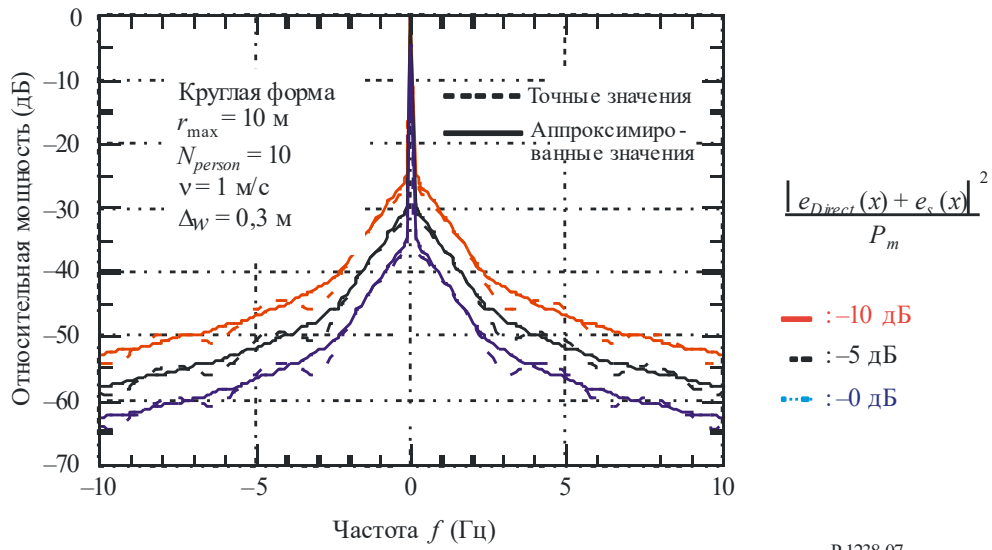
Коэффициент автокорреляции уровня принимаемого сигнала в помещении круглой формы



P.1238-06

РИСУНОК 7

Энергетический спектр в помещении круглой формы



P.1238-07