

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1410-4

**Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования,  
требующиеся для проектирования наземных широкополосных систем  
радиодоступа, работающих в полосе частот от 3 до 60 ГГц**

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(1999-2001-2003-2005-2007)

**Сфера применения**

Широкополосный беспроводной доступ является важным методом обеспечения широкополосности для отдельных домашних хозяйств, а также небольших коммерческих предприятий. В настоящей Рекомендации рассматриваются системы, работающие в диапазоне частот от 3 до 60 ГГц, и приводятся руководящие указания для важных механизмов распространения на линии прямой видимости и в условиях отсутствия прямой видимости. Для затронутых систем приводятся методы дождя, для того чтобы определить различного рода улучшения путем выбора наилучшей из двух базовых станций и уменьшение покрытия в условиях дождя. Приводятся руководящие указания, касающиеся широкополосного искажения.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что для надлежащего планирования наземных широкополосных систем радиодоступа необходимо, чтобы имелись соответствующие данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования;
- b) что Рекомендации, разработанные для проектирования отдельных линий связи, не охватывают аспекты зон,

*рекомендует,*

1 чтобы при проектировании наземных широкополосных систем радиодоступа, работающих в полосе частот от 3 до 60 ГГц, использовались информация о распространении радиоволн и методы прогнозирования, изложенные в Приложении 1.

**Приложение 1****1 Введение**

Растет интерес к предоставлению услуг широкополосной связи по местным сетям доступа отдельным домашним хозяйствам, а также небольшим коммерческим предприятиям. Все чаще технические решения с использованием радиосвязи рассматриваются в качестве систем доставки, и эти системы сегодня имеются на рынке. Рассматриваются и внедряются несколько таких систем, например местная система многоадресного распределения (LMDS), местная система многоадресной связи (LMCS) и система связи пункта со многими пунктами (P-MP). В совокупности эти системы можно назвать системами широкополосного беспроводного доступа (BWA). Разрабатываются международные стандарты, например WiMAX, основанный на IEEE 802.16 и HiperMAN.

Есть потребность в умелом руководстве по проектированию, касающемся вопросов распространения радиоволн, необходимом в рамках сетевого планирования, для групп операторов и производителей, а также регуляторных органов.

## 2 Покрывтие зоны

При планировании сотовой системы связи оператор должен тщательно выбирать местоположение базовой станции и высоту над уровнем земли, с тем чтобы иметь возможность предоставлять услуги намеченному числу пользователей в пределах зоны. Размер ячеек может варьироваться в зависимости от топографии местности, а также от числа пользователей, которым предлагаются услуги радиосвязи. В данном разделе представлена статистическая модель затенения зданиями, основанная на очень простых характеристиках расположенных в зоне зданий, и приведено руководство, основанное на детальном расчете. В нем также приведена модель затухания радиоволн за счет растительного покрова и некоторые простые правила проектирования.

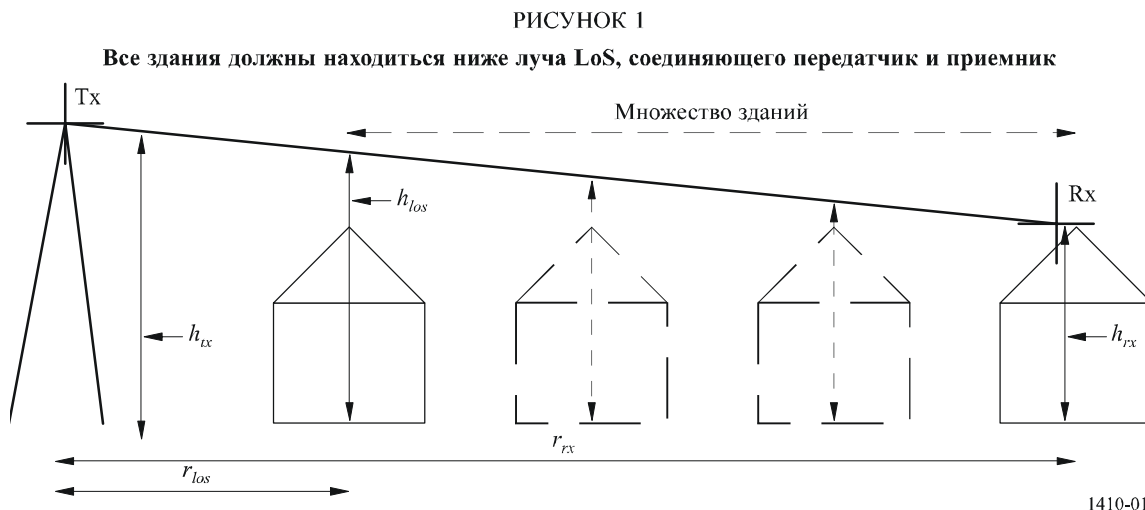
### 2.1 Затенение зданиями

Вероятность затенения зданиями можно лучше всего оценить при помощи методов отслеживания траектории луча с использованием реальных данных, содержащихся в подробных базах данных о зданиях и рельефе местности. Требования к методам отслеживания траектории луча кратко описаны в п. 2.1.1. Однако во многих зонах подходящие базы данных отсутствуют, и в этом случае рекомендуют использовать статистическую модель, представленную в п. 2.1.2.

#### 2.1.1 Требования к отслеживанию траектории луча

Точный прогноз покрытия можно получить с использованием методов отслеживания траектории луча в тех зонах, где имеется база данных о покрытии местности. В силу высоких частот и трасс небольшой длины можно использовать приближения геометрической оптики с представлением прямыми линиями.

При оценке покрытия для получения приближения первого порядка достаточно определить оптическую линию прямой видимости (LoS) в пределах 60% просвета 1-й зоны Френеля, чтобы обеспечить пренебрежимо малые дополнительные потери (см. рисунок 1). В случае отсутствия линии прямой видимости возникают сильные дифракционные потери. Точность базы данных для зданий ограничит точность предсказания луча, и поэтому база данных должна содержать точные сведения о рельефе местности и зданиях на трассе распространения. Для трасс  $> 2$  км должна учитываться также кривизна поверхности Земли. Для этого метода здания и растительный покров следует считать непрозрачными.



Результаты измерений характеристик сигнала при сравнении с результатами, полученными с использованием моделей отслеживания траектории луча, показали хорошее статистическое соответствие, но измерения продемонстрировали существенную изменчивость сигнала с изменением положения и со временем для трасс без четкой LoS. Поэтому с учетом ограниченной точности реальных баз данных прогнозы качества обслуживания для конкретных трасс почти прямой видимости невозможны.

Растительность, в частности высокие деревья и кустарники, может вызывать значительное ухудшение качества обслуживания, и в идеале данные по растительному покрову следует включать в базу данных.

Измерения показали, что при предоставлении услуг в типовых городских/пригородных районах снижение качества обслуживания пользователей за счет влияния многолучевых отражений возникает намного реже, чем за счет затенения зданиями или растительностью из-за узкого луча антенны, и поэтому нет необходимости рассчитывать отражения (см. п. 4.2.1).

Для оценки с использованием методов отслеживания траектории луча может применяться подробная объектно-ориентированная база данных с указанием высоты рельефа, контуров отдельных зданий, включая высоту крыши и данные о форме, и с представлением растительного покрова в виде отдельных деревьев или групп деревьев. Или же, при определении LoS можно использовать растровую базу данных с отметками высоты, такую как получают с самолета с помощью бортового радара с синтезированным раскрытием антенны (SAR) (см. таблицу 1).

ТАБЛИЦА 1

## Минимальные требования к базе данных

Объект	Формат	Разрешение по горизонтали (м)	Разрешение по вертикали (м)
Рельеф	Сетка отметок высоты	50	1
Здания	Пообъектное представление или растровое изображение с высоким разрешением	1	1
Растительный покров			

## 2.1.2 Рассмотрение отражений и рассеяния

В условиях городской среды отражения от стоящих поблизости зданий могут являться преобладающим механизмом распространения в условиях отсутствия прямой видимости. Эффективные методы расчета отражений в крупных базах данных стали предметом многочисленных научных исследований и статей. При рассмотрении многократных отражений и дифракций эта проблема становится трудноразрешимой для всех, за исключением самых простых, сценариев. Вот почему рекомендуется модель однократного отражения, причем каждая трасса в направлении отражателя и от отражателя подвержена своим собственным вертикальным и горизонтальным дифракционным потерям.

## Модель рассеяния на неровной поверхности

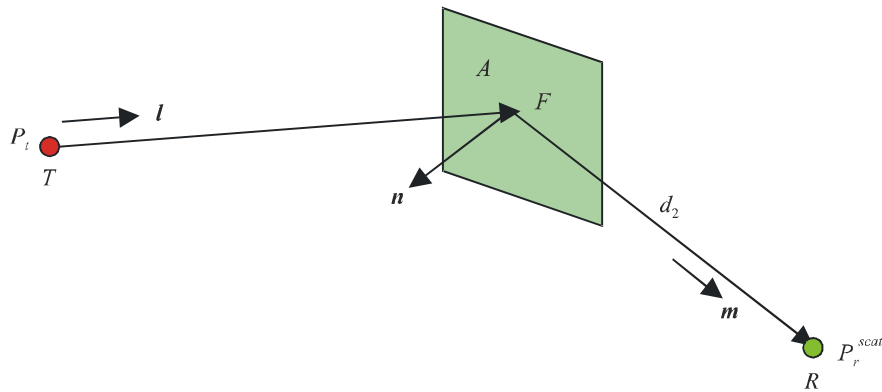
Для того чтобы свести к минимуму дополнительные расчеты, предлагается использовать приводимую здесь простую модель. Эта модель является скалярной моделью для беспорядочного рассеяния от неровной поверхности. То есть в ней рассматривается только рассеянная мощность и не учитываются фазовый и поляризационный эффекты.

## Геометрия

Допустим, что  $F$  – это грань неровной поверхности зоны  $A$ . Предположим, что  $T$  и  $R$  – это передатчик и приемник.  $\vec{i}$  и  $\vec{m}$  – единичные векторы в направлениях  $TF$  и  $FR$ , а  $n$  – перпендикуляр к этой грани, как это представлено на рисунке 2.

РИСУНОК 2

## Геометрия отражения



1410-02

$P_t$  и  $P_r^{scat}$  – переданные и принятые мощности рассеяния, соответственно, в  $T$  и  $R$ , и, без потери общности, допустим, что  $T$  и  $R$  имеют всенаправленные антенны.

**Распространение радиоволн от  $T$  до  $F$** 

Если предположить, что распространение происходит в свободном пространстве, то плотность потока мощности (п.п.м.)  $S$  (Вт/м<sup>2</sup>) на расстоянии  $d_1$  от  $T$  составит:

$$S = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left( \frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 P_t, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны. Тогда мощность  $P_{fr}$ , падающая на  $F$ , составит:

$$P_{fr} = SA |\vec{l} \cdot \vec{n}|. \quad (2)$$

Данный результат предполагает, что любой размер  $A \ll d$  таков, что п.п.м. по всей грани является постоянной. Это ограничение не является строгим: в принципе может быть выбрана столь малая грань  $A$ , насколько это необходимо, для того чтобы достичь цели. Однако в данной модели мы исходим из предположения, что  $F$  фактически представляет собой полный фасад здания (или, по крайней мере, его освещенную часть) и что это ограничение удовлетворено. Эталонной точкой для рассеяния является центр грани.

**Модель рассеяния на неровной поверхности**

Эта модель является той моделью, которая используется для изображения диффузного рассеяния в компьютерной графике. В ней предполагается, что некогерентная мощность, рассеянная неровной поверхностью  $F$ , является ламбертовой. То есть эта мощность вновь излучается во всех направлениях (в полуплоскости), а ее интенсивность колеблется, как  $\cos\theta$ , где  $\theta$  – угол излучения по отношению к перпендикуляру. Это колебание полностью нейтрализует зависимость  $1/\cos\theta$  от излученной п.п.м. (ввиду проекционного члена  $|\vec{m} \cdot \vec{n}|$ ), обеспечивая ненаправленное излучение с равным усилением во всех направлениях. Это соответствует тому, что происходит на практике для оптического рассеяния. Некогерентная мощность, излученная  $F$ , имеет вид:

$$P_{fi} = 2\rho_{nonspec} P_{fr}. \quad (3)$$

Множитель 2 учитывает тот факт, что вся мощность излучается в какую-либо полусферу.  $\rho_{nonspec}$  учитывает долю когерентной мощности, падающей на  $F$ , которая вновь излучается как незеркальное рассеяние.

### Распространение радиоволн от $F$ до $R$

Если предположить, что распространение происходит в свободном пространстве и при всенаправленной антенне, то полученная мощность рассеяния в  $R$  составит:

$$P_r^{scat} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 P_{ft}. \quad (4)$$

### Полный энергетический потенциал линии связи

Объединение уравнений (1) и (2) дает:

$$P_r^{scat} = 2\rho_{nonspec} \frac{4\pi A |\vec{i} \cdot \vec{n}|}{\lambda^2} \left( \frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 P_t. \quad (5)$$

Члены  $(\lambda/4\pi d)^2$  – это условия распространения в свободном пространстве, которые в большинстве случаев могут быть заменены фактическими условиями распространения. Также могут быть включены диаграммы направленности усиления антенн в  $T$  и  $R$ . Единственное допущение, которое необходимо принять, это допущение падения плоской волны в  $F$ .

### Потеря рассеяния

Возможно, было бы целесообразно рассчитать некогерентную "потерю" рассеяния на неровной поверхности. Это еще один вид потерь на трассе, которому подвергается рассеяние в дополнение к той потере на трассе, которая произошла бы в том случае, если бы грань была абсолютно зеркальной, т. е. с зеркальным отражением при коэффициенте отражения, равном 1. Чтобы это осуществить, необходимо будет предположить, что распространение происходит в свободном пространстве на трассах  $TF$  и  $FR$ . Мощность, полученная в  $R$  от передатчика, находящегося в  $T$ , при условии абсолютного отражения  $P_r^{LoS}$ , составит:

$$P_r^{LoS} = \left( \frac{\lambda}{4\pi(d_1 + d_2)} \right)^2 P_t. \quad (6)$$

Тогда потеря рассеяния  $L_{scat}$  (определена таким образом, чтобы для потери  $L_{scat} > 1$ ) составит:

$$\frac{1}{L_{scat}} = \frac{P_r^{scat}}{P_r^{LoS}} = \frac{|\vec{i} \cdot \vec{n}|}{2\pi} \rho_{nonspec} \frac{(d_1 + d_2)^2 A}{d_1^2 d_2^2}. \quad (7)$$

Все члены в этом выражении строго  $< 1$ , кроме последнего члена, который может стать  $> 1$ , если значение  $A$  слишком велико, по сравнению с  $d_1$  и  $d_2$ . Однако, как отмечалось выше, данная модель действительна только в том случае, если какой-либо параметр  $A \ll d_1$ , т. е. применение уравнения (7) должно обеспечить соблюдение следующего условия:

$$\frac{(d_1 + d_2)^2 A}{d_1^2 d_2^2} \leq 1. \quad (8)$$

Это условие будет нарушено только в том случае, если передатчик и приемник расположены слишком близко к  $F$ .

Уравнение (7) показывает, что потеря незеркального рассеяния быстро увеличивается по мере удаления пункта приема от поверхности рассеяния. Поскольку  $d_1 \rightarrow \infty$ , то потеря (в децибелах)  $\rightarrow 10 \log(d_2^2/A)$ . Таким образом, при фасаде здания площадью  $100 \text{ м}^2$  потеря только от одного этого члена составит 20 дБ на расстоянии 100 м и 40 дБ на расстоянии 1 км от здания.

### Определение $\rho_{nonspec}$

Определяя  $\rho_{spec}$  и  $\rho_{trans}$  как долю когерентной мощности, падающей на  $F$ , которая отражается как зеркальное (когерентное) отражение и, соответственно, передается через эту грань, можно было бы использовать соответствующую модель процесса полного рассеяния для сохранения энергии, дающую:

$$\rho_{spec} + \rho_{trans} + \rho_{nonspec} = 1. \quad (9)$$

К сожалению, наша полуэмпирическая модель для этого не подходит, и поэтому для каждого механизма делаются различные допущения:

- $\rho_{spec}$ : Наиболее обоснованной с теоретической точки зрения является модель для зеркального рассеяния. Для гладкой грани отраженная мощность определяется путем использования коэффициентов френелевского отражения (которые зависят от угла зеркального отражения и электрических свойств соответствующих граней). Однако для рассеяния на неровной поверхности простого продолжения не существует, и данная модель использует полуэмпирический член, который изменяет (уменьшает) коэффициент френелевского отражения на гладкой поверхности. Предлагается определить  $\rho_{spec}$ , как показатель снижения мощности только в результате воздействия неровной поверхности; т.е. он не учитывает колебание отраженной мощности, вызываемое изменением френелевского коэффициента. Последний зависит от угла отражения и поляризации, и поэтому от него же зависит диффузная рассеянная мощность; это было бы несовместимо с ламбертовым допущением.
- $\rho_{trans}$ : В принципе передаваемый компонент также может быть рассчитан на основе френелевской теории для гладкой поверхности с единственным интерфейсом. Однако на практике ситуация слишком сложна для создания модели (неровная поверхность, многочисленные интерфейсы и отражения), и поэтому для  $\rho_{trans}$  следует использовать эмпирическое значение, выявленное экспериментальным путем.

В принципе каждое  $\rho$  должно удовлетворять условию  $0 \leq \rho \leq 1$ . Нет никаких оснований полагать, что уравнение (9) будет удовлетворено, и если его использовать для того, чтобы получить  $\rho_{nonspec}$  из  $\rho_{spec}$  и  $\rho_{trans}$ , то возможно, что  $\rho_{nonspec}$  станет отрицательным, что было бы неестественным. Поэтому долю с отсутствием зеркального отражения предлагается получить непосредственно из доли с зеркальным отражением, без учета передаваемого компонента:

$$\rho_{nonspec} = 1 - \rho_{spec}. \quad (10)$$

На практике  $\rho_{trans}$  может оказаться небольшим (например, потери при проникновении в здание на уровне 10 дБ предполагают  $\rho_{trans} = 0,1$ ).

### Расчет $\rho_{spec}$

$\rho_{spec}$  – это показатель снижения мощности, применяемый к коэффициенту зеркального отражения для того, чтобы учесть воздействие неровной поверхности на зеркальное отражение. Он равен:

$$\rho_{spec} = \rho_s^2. \quad (11)$$

При расчете коэффициента зеркального отражения коэффициент фактического отражения  $R$  получается путем умножения френелевского коэффициента  $R_F$  на  $\rho_s$ :

$$R = \rho_s R_F, \quad (12)$$

$\rho_s$  может быть рассчитан следующим образом:

$$\rho_s = \max\left[\exp\left(-\frac{1}{2}g^2\right), 0,15\right], \quad (13)$$

где:

$$g = \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \cos \varphi, \quad (14)$$

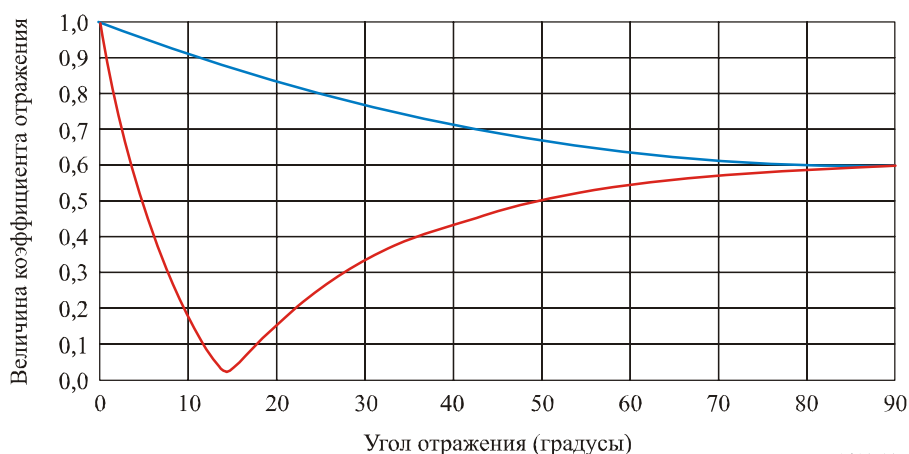
$\sigma$  – стандартное отклонение высоты неровности поверхности в окрестности локальной средней величины в пределах первой френселевской зоны, а  $\phi$  – угол падения к нормали поверхности. Обрезание в 0,15 в уравнении (13) призвано не допустить того, чтобы  $\rho_s$  стало слишком маленьким. (Экспоненциальный член имеет тенденцию к занижению рассеяния для очень неровных поверхностей.)

Расчет коэффициента зеркального отражения в уравнении (13) сложен. Френселевский коэффициент зависит от угла, электрических постоянных и *поляризации*. Зависимость от поляризации означает, что обычно необходимо рассчитать коэффициенты как параллельного, так и перпендикулярного френселевского отражения, а геометрия трассы луча должна учитывать вращение плоскости поляризации при расчете сигнала в приемнике.

С учетом эмпирического характера данной модели, если моделирование касается только мощностей сигнала (и может игнорировать фазу), то можно сделать упрощение путем расчета всех зеркальных отражений только на основе параллельного френселевского коэффициента. Если электрический вектор лежит в плоскости падающих и отраженных лучей (голубая или верхняя кривая, на рис. 3), то величина этого коэффициента всегда количественно больше, чем данный коэффициент, когда электрический вектор перпендикулярен плоскости (красная или нижняя кривая). В трехмерной базе данных, как правило, будет происходить смещение двух компонентов поляризации, и параллельная компонента будет стремиться скрыть "нуль" в перпендикулярной компоненте.

РИСУНОК 3

Величина параллельного (голубая линия) и перпендикулярного (красная линия) коэффициента френселевского отражения  $R_F$ , как функция угла (3,5 ГГц, поверхность средней сухости)



1410-03

### Расчет $\rho_{trans}$

$\rho_{trans}$  – это доля мощности падающего луча, переданная сквозь стену. В данном применении предполагается, что значение  $\rho_{trans}$  является постоянной независимой величиной угла передачи относительно грани и что эта грань не изменяет угол луча по мере того, как он проходит сквозь нее.

### Вопросы, которые следует отметить

- 1 Потеря рассеяния на неровной поверхности определяется уравнением (10), а доля мощности незеркального отражения определяется с помощью уравнений (11), (13) и (14).
- 2  $L_{scat}$  прямо не зависит от  $\lambda$ , а зависит только от частоты через  $\rho_{nonrec}$ . Как и ожидалось, это – скалярная модель мощности, а модель источника по Ламберту не зависит от частоты.

- 3 Модель, которая корректно представляла бы фазу и поляризацию, была бы гораздо более сложной и несовместимой с моделью некогерентного рассеяния. Более того, она потребовала бы детального знания формы неровностей поверхности, что, по-видимому, не удалось бы получить никогда. (Возможно, это удалось бы сделать для поверхности с "незначительными" неровностями, путем использования подхода, связанного с возмущениями, однако такую модель когерентного рассеяния лучше было бы использовать в рамках измененной модели зеркального отражения.)
- 4 На основании пункта 3 делается вывод, что эту модель рассеяния действительно целесообразно использовать только для моделирования *помехи*, поскольку предполагается, что мощность помехи добавляется некогерентно. Для полезного сигнала этот результат может быть использован для оценки разброса задержки. Для того чтобы осуществить суммирование, необходимое для получения общей мощности сигнала, необходима более подробная оценка фазы (или, эквивалентно, разности длин трасс).
- 5 Модель незеркального рассеяния не удовлетворяет взаимности. На самом деле, *почти удовлетворяет*, однако включение члена  $|\vec{\Gamma} \cdot \vec{n}|$  при отсутствии соответствующего члена  $|\vec{m} \cdot \vec{n}|$  нарушает симметрию. Выбрав иную модель источника рассеяния, отличную от ламбертовой, можно исправить этот недостаток. Однако эта модель в любом случае является полуэмпирической, и простыми допущениями взаимности не достичь.

### 2.1.3 Передача волн сквозь здания

Измерения, о которых сообщалось в Рекомендации МСЭ-R P.1411 и (ссылки на опубликованные результаты измерений) показывают, что проникновение сигнала сквозь здания выше нижнего уровня соответствующего диапазона частот может стать важным механизмом распространения (потеря дополнительно 20–40 дБ), если дифракционная потеря вокруг соответствующего здания или над ним достаточно велика. Подобно коэффициентам затухания отражения эти потери будут зависеть от материала, из которого изготовлено здание, радиочастоты, а также внутренней структуры зданий (внутренние стены). Потери могут быть либо смоделированы, как некая последовательность потерь в стенах (когда имеются достаточно полные данные), либо рассчитаны как потери на один метр через все здание. В случае, если прямую трассу преграждают несколько зданий, то лучше было бы игнорировать этот механизм, поскольку в противном случае пришлось бы учитывать также сочетание трасс дифрагированной, отраженной и прошедшей сквозь здание волн.

### 2.1.4 Статистическая модель

Для заданного положения передатчика (Tx) и приемника (Rx) вероятность наличия между ними луча LoS определяется сочетанием вероятностей того, что каждое здание на трассе распространения находится ниже луча, соединяющего передатчик и приемник, в точке, в которой луч пересекает здание. На рисунке 1 показана геометрия расположения и определены члены уравнения (15). В этой модели предполагается, что рельеф плоский или имеет постоянный уклон во всей рассматриваемой зоне.

Высота луча в точке расположения препятствия  $h_{los}$  задается следующим выражением:

$$h_{LoS} = h_{tx} - \frac{r_{LoS}(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}}, \quad (15)$$

где:

- $h_{tx}$ : высота передатчика над уровнем земли;
- $h_{rx}$ : высота приемника на расстоянии  $r_{rx}$ ;
- $r_{LoS}$ : расстояние от передатчика до препятствия.



Если предположить, что в среднем здания распределены равномерно в пространстве, то можно оценить число зданий, находящихся между двумя точками. Вероятность наличия луча LoS равна:

$$P(LoS) = \prod_{b=1}^{b_r} P(\text{высота здания} < h_{LoS}), \quad (16)$$

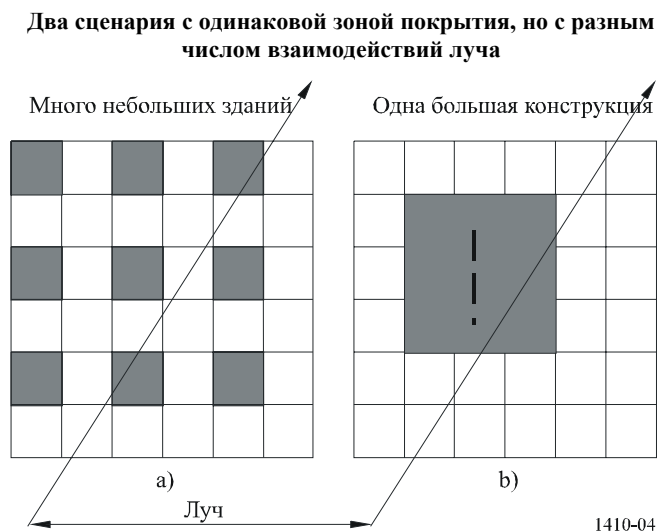
где  $b_r$  – число пересекаемых зданий.

Для этой простой модели требуются три параметра:

- $\alpha$ : отношение площади, занятой зданиями, ко всей площади зоны (безразмерное);
- $\beta$ : среднее число зданий на единицу площади (число зданий/км<sup>2</sup>);
- $\gamma$ : переменная, определяющая распределение высоты зданий.

Для предполагаемого распределения Рэлея переменная  $\gamma$  равна наиболее вероятной высоте здания (моду). Причины различия  $\alpha$  и  $\beta$  иллюстрируются на рисунке 4. Как на рисунке 4а), так и на рисунке 4б) покрываемые площади одинаковы и, следовательно, одинаковы значения  $\alpha$ , но на рисунке 4а) можно ожидать большего взаимодействия луча, чем на рисунке 4б). Однако одно отношение  $\alpha$  не позволяет отличить две схемы, приведенные на рисунке 4. Если здания на рисунках 4а) и 4б) имеют одинаковую высоту, вероятность гашения для множества небольших зданий будет существенно ниже, чем гашения для одного большого здания.

РИСУНОК 4



Для пригородных районов и районов многоэтажной застройки  $\alpha$  меняется от 0,1 до 0,8, а  $\beta$ , соответственно, – от 750 до 100.

Распределение вероятности Рэлея  $P(h)$  для высоты  $h$  определяет параметр  $\gamma$ :

$$P(h) = \frac{e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}}}{\gamma^2} h. \quad (17)$$

### 2.1.5 Алгоритм и расчет

При заданных  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  покрытие LoS рассчитывают следующим образом:

Луч длиной 1 км проходит над  $\sqrt{\beta}$  зданиями, если они расположены по регулярной решетке. Если покрывается только часть  $\alpha$  зоны, ожидаемое число проходимых зданий на 1 км определяется следующим выражением:

$$b_1 = \sqrt{\alpha \beta} \quad (18)$$

и поэтому для трассы длиной  $r_{rx}$  (км) число зданий равно:

$$b_r = \text{floor}(r_{rx} b_1), \quad (19)$$

где функция floor введена для обеспечения того, чтобы в уравнение (16) входило целое число членов.

*Расчет вероятности наличия луча LoS для каждого расстояния  $r_{rx}$ :*

*Шаг 1:* Рассчитайте число зданий  $b_r$  между точками Tx и Rx с использованием уравнения (19).

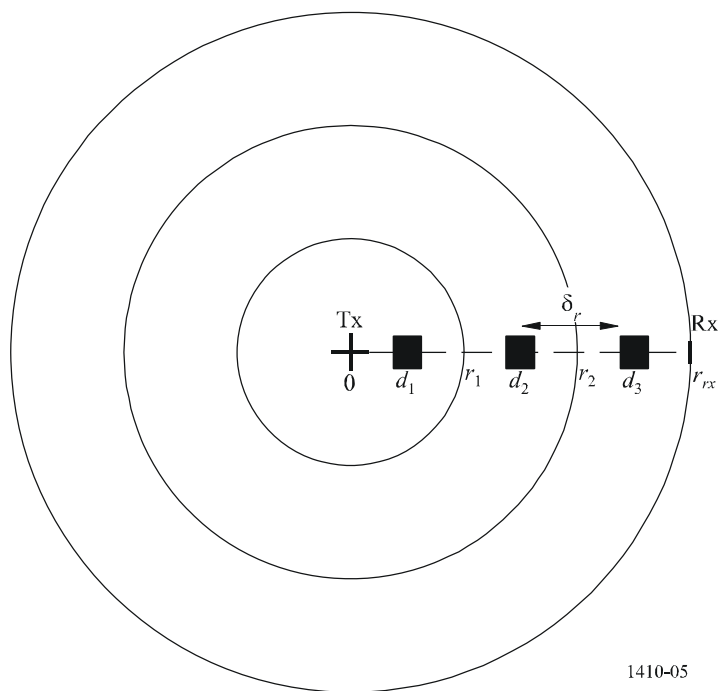
*Шаг 2:* Если предположить, что здания равномерно распределены в пространстве между точками Tx и Rx, то расстояние до здания определяется следующим образом:

$$d_i = (i + 1/2) \delta_r, \quad i \in \{0, 1, \dots, (b_r - 1)\}, \quad (20)$$

где  $\delta_r = r_{rx}/b_r$  – расстояние между зданиями.

РИСУНОК 5

Расположение зданий относительно Rx на расстоянии  $r_{rx}$  от Tx



*Шаг 3:* Для каждого  $d_i$  высота  $h_i$  здания, которое будет создавать препятствие для луча LoS, получается при подстановке  $d_i$  в уравнение (15).

$$h_i = h_{tx} - \frac{d_i (h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}}. \quad (21)$$

Шаг 4: Вероятность  $P_i$ , что высота здания меньше  $h_i$ , определяется как:

$$P_i = \int_0^{h_i} P(h) dh \quad (22)$$

$$= 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2}$$

Шаг 5: Вероятность  $P_{LoS,i}$  наличия луча LoS в положении  $d_i$  определяется как:

$$P_{LoS,i} = \prod_{j=0}^i P_j \quad j \in \{0, \dots, i\}. \quad (23)$$

Шаг 6: Результирующее покрытие получают путем умножения каждой вероятности  $P_{LoS,i}$  на веса  $W_i$ , зависящие от расстояния от передатчика. Это позволяет учесть число зданий на кольцевом пространстве, которое растет с увеличением расстояния.

$$W_i = 2i + 1. \quad (24)$$

Шаг 7: Если суммировать взвешенные вероятности для зданий и нормировать на общую площадь кольцевого участка, умноженную на плотность зданий, то получится требуемое покрытие для ячейки радиусом  $r_{rx}$ :

$$CP_{r_{rx}} = \frac{\sum_{i=0}^{b_r-1} P_{LoS,i} W_i}{b_r^2}. \quad (25)$$

Используемая в настоящее время модель имеет ряд ограничений, и существует несколько способов расширения такой модели.

- В этой модели не учтены изменения рельефа местности. Ясно, что изменение даже на несколько метров может иметь существенный эффект. Сочетание статистических характеристик модели с грубой базой данных о рельефе местности путем добавления средней отстройки для высоты затенения для каждой контрольной точки в модели позволяет расширить прогностические возможности модели.
- Плотность и высота зданий заметно изменяются от района к району, и поэтому прогноз в одном направлении должен отличаться от прогноза в другом направлении. Из измеренных распределений зданий по высоте ясно, что здания не соответствуют идеально простой статистической модели. Разбивка базы данных на меньшие районы и присвоение каждому району собственного набора параметров позволяют существенно продвинуться в решении этой проблемы.
- В действительности приемники устанавливают на крышах зданий, поэтому распределение приемников по высоте подчиняется тому же распределению, что и распределение отметок высоты зданий. В модели предполагается, что приемники находятся на постоянной высоте относительно земли. Альтернативный вариант состоит в получении высоты приемников из распределения зданий по высоте; и вновь это будет зависеть от района.
- Полученный с помощью такого алгоритма метод дает хорошие оценки покрытия в сравнении с результатами, полученными с использованием отслеживания траектории луча на базе реальных данных, см. п. 2.1.6. Распределение Рэлея для высоты зданий оказалось точным для некоторых выборок данных при рассмотрении ограниченной зоны, например небольшого города. Кроме того, для получения результатов покрытия, описанных в п. 2.1.6, необходимо шаг за шагом использовать модель расположения зданий и просвета трассы, как указано в приведенной выше процедуре.

### 2.1.6 Примеры прогнозирования покрытия

Аппроксимация Рэля была получена для кумулятивного распределения высоты крыш в пригородном районе в Соединенном Королевстве (Малверн). Для этого массива данных были получены следующие усредненные параметры модели для основного городского района:

$$\alpha = 0,11; \quad \beta = 750; \quad \gamma = 7,63.$$

На рисунках 6 и 7 приведены полученные с помощью модели результаты. На рисунке 6 показано покрытие в зависимости от высоты передатчика, а на рисунке 7 – в зависимости от высоты приемника.

Модель позволяет получить прогнозы с той же основной формой и общим уровнем покрытия, как и результаты, получаемые с помощью подробного моделирования по методу отслеживания траектории луча. Эта модель полезна тем, что с ее помощью можно сделать прогноз покрытия на основе всего трех параметров, которые можно приблизительно рассчитать для любого городского района, при условии что об этом районе кое-что известно. При наличии большего числа трехмерных данных можно составить таблицы параметров для разных городов, которые можно использовать в качестве справочной информации при оценке покрытия в неизвестном месте. Модель можно использовать не только для оценки покрытия в отдельной ячейке, но и, объединив результаты для многих ячеек, для получения покрытия в больших сетях, включая влияние разнесения.

РИСУНОК 6

Смоделированное кумулятивное покрытие для приемника на высоте 7,5 м  
и передатчика на высоте 5, 10, 15, 20, 25 и 30 м

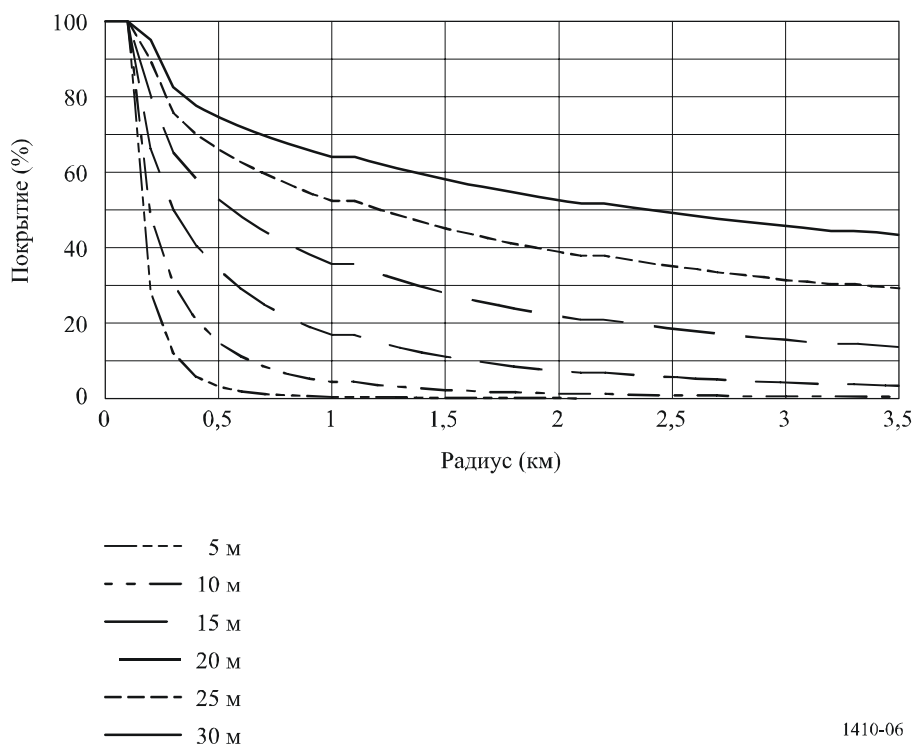
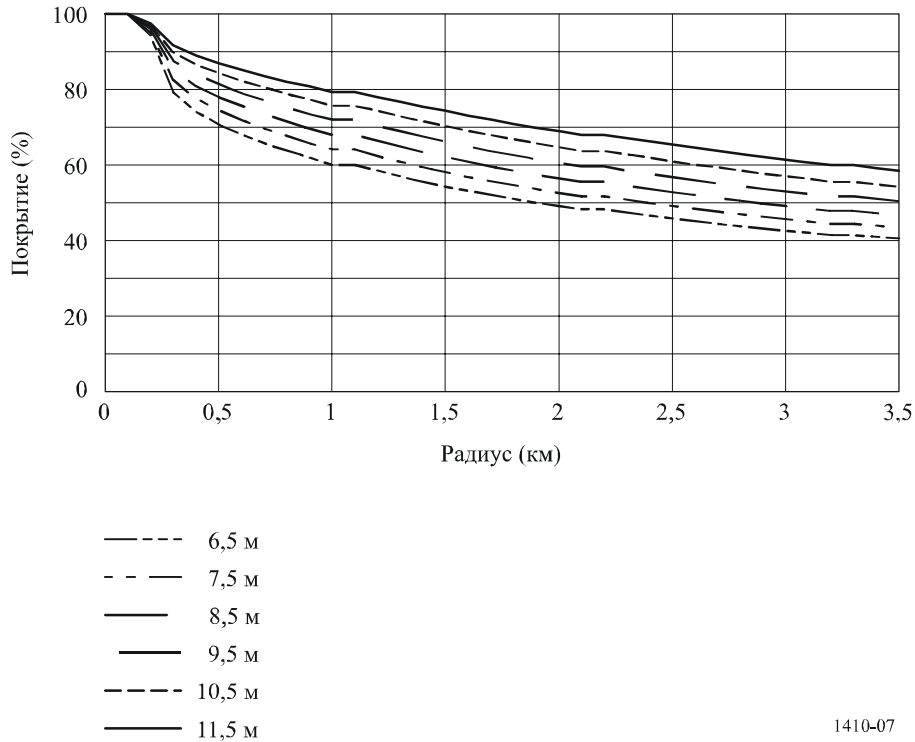


РИСУНОК 7

Смоделированное кумулятивное покрытие для передатчика на высоте 30 м  
и приемника на высоте 6,5, 7,5, 8,5, 9,5, 10,5 и 11,5 м



### 2.1.7 Увеличение покрытия при использовании двух и более базовых станций

Сотовая архитектура, позволяющая приемнику выбирать между несколькими базовыми станциями, обеспечивает значительное увеличение покрытия. Например, согласно расчетам с использованием метода отслеживания траектории луча, при высоте антенны передатчика 30 м покрытие в ячейке радиусом 2 км увеличивается от 44% для одной базовой станции до 80% для двух базовых станций и 90% для четырех станций, даже если базовые станции не выбирают специально для достижения хорошей видимости для конкретного приемника.

Если предположить, что вероятность трасс LoS к разным представляющим интерес базовым станциям статистически независима, можно рассчитать вероятность наличия хотя бы одной трассы. Сначала следует рассчитать каждую вероятность  $P_{LoS,i}$  по уравнению (23). Тогда вероятность наличия хотя бы одной трассы прямой видимости при заданных  $m$  возможных базовых станциях равна:

$$P_{LoS,i} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_{LoS,i,k}). \quad (26)$$

Заменив  $P_{LoS,i}$  в уравнении (23) на уравнение (26) в описанной в п. 2.1.5 процедуре, можно рассчитать покрытие при использовании двух или более станций. Следует отметить, что для каждого  $k$  необходимо выполнить шаги с 1 по 5 при использовании расстояния  $r_{rx}$  до каждой базовой станции.

## 2.2 Затухание за счет растительного покрова

Затенение деревьями может существенно ограничить число домов, где могут предоставляться услуги радиосвязи. Следовательно, очень важно иметь надежную модель последствий и степени затухания за счет растительного покрова, поскольку для приемников вблизи передатчика системный запас может быть таким, что уровень сигнала после прохождения через отдельное дерево оказывается недостаточным для предоставления услуг.

Исследование по методу отслеживания траектории луча, проведенное в шести городах Соединенного Королевства с использованием баз данных, включающих все здания и деревья, показало, что до 5% зданий в радиусе 1000 м от центральной базовой станции затеняются растительностью. Базовая станция находилась на крыше самого высокого здания в зоне, обычно на высоте 30–40 м над уровнем земли, и здание считалось незатененным, если существовала трасса прямой видимости к каждой контрольной точке на данном здании. Контрольные точки на здании располагались на равномерной решетке с шагом 1 м в высшей точке в пределах занимаемой зданием площади земли. На расстояниях более 1200 м процент затенения растительностью не менялся, при условии что сохранялась высота базовой станции. На больших расстояниях за счет кривизны поверхности Земли основной причиной затенения становились другие здания, а иногда и рельеф местности. В пригородной зоне затенение растительностью достигло приблизительно 25%.

Для определения значимости затухания за счет "местных деревьев" были проведены измерения на частоте 42 ГГц. Среднее затухание оказалось соответствующим ожидаемому значению по Рекомендации МСЭ-R P.833, но со значительным эффектом многолучевого распространения, вызывающим глубокие нули сигнала, которые изменялись со временем по мере движения растительности на ветру. Было установлено, что эти многолучевые нули можно с успехом декоррелировать путем использования двух антенн на расстоянии примерно 60 см и более. При меньшем расстоянии получается большая корреляция, а большие расстояния незначительно улучшают декорреляцию затухания. Это позволяет предположить, что использование пространственного разнесения между двумя антеннами может обеспечить возможность предоставления услуг в такой ситуации. Эксперимент на частоте 42 ГГц с использованием двух антенн на расстоянии 62 см показал существенное отличие для отдельных антенн, а также возможность улучшения за счет разнесения. Длительные измерения распространения радиоволн через деревья с листвой показали, что обычно можно получить выигрыш за счет разнесения 10 дБ.

Затухание за счет деревьев весьма велико на миллиметровых волнах. Коэффициент затухания зависит от типа деревьев, содержания влаги и геометрии трассы, но в качестве ориентира можно использовать коэффициент затухания 4–5 дБ/м (хотя при некотором значении порядка 20–40 дБ возникает насыщение затухания). Для определения значимости затухания за счет растительного покрова предполагается использовать модель, приведенную в Рекомендации МСЭ-R P.833.

### 2.3 Тематическое исследование механизмов распространения

Предлагаемое в настоящем разделе имитационное моделирование основывается на результатах тематического исследования, использующего базу данных реальной городской местности. В нем представлены результаты, показывающие преобладающие механизмы распространения для покрытия, а также статистическое распределение отношения мощности несущей к мощности помехи (CIR) для какого-либо сценария помех.

#### 2.3.1 Описание местности

В качестве местности для проведения исследования был выбран городской район Манчестера, Соединенное Королевство, площадью 2 км × 1 км. На территории данного района расположены три здания, значительно возвышающиеся над окружающими их зданиями. Статистические данные покрытия были оценены с передатчиком, расположенным на 15 м выше, чем самое высокое из этих зданий. Статистические данные в отношении помех были оценены с мешающим передатчиком, расположенным на одной из других высотных башен. Потери на трассе были оценены в равномерной решетке, расположенной на высоте 2 м над исследуемой местностью. Все точки были подразделены на два вида: точки на крышах зданий и точки на уровне улицы.

#### 2.3.2 Смоделированные механизмы распространения

Расчет распространения использует:

- Рекомендацию МСЭ-R P.526 с дифракцией в 1 деление по малой шкале
- Дифракция вокруг
- Передача через здания
  - Диэлектрическая проницаемость поверхности = 5
  - Потери внутри здания = 2,1 дБ/м

- Отражения и рассеяния
  - Однократное и двукратное отражение. Трассы отсутствия прямой видимости с включенной дифракцией/передачей
  - Диэлектрическая проницаемость поверхности = 5
  - Стандартное отклонение неровности поверхности = 0,001 м.

### 2.3.3 Покрытие с использованием различных механизмов распространения

В таблице 2 показано, как увеличение количества смоделированных механизмов распространения изменило прогнозы покрытия на частоте 2,4 ГГц. Разницы потерь на трассе приведены относительно прогнозов Рекомендации МСЭ-R P.526 для одной точки.

ТАБЛИЦА 2

#### Сводная таблица разниц потерь на трассе для различных механизмов распространения Рекомендации МСЭ-R 452 для одной точки

Все точки	МСЭ-R452 с одной точкой			МСЭ-R452 с 3 точками			Проникновение здания + горизонтальная дифракция				
	Четкая LOS в %	1-я зона Френеля в %	% выше	Четкая LOS в %	1-я зона Френеля в %	% выше	Четкая LOS в %	1-я зона Френеля в %	% выше	% включит.	% приблиз.
	45,57	9,03	45,40	45,57	9,03	45,40	45,57	9,03	24,85	6,86	13,70
				средн. расхожд.	-3,56 дБ		средн. расхожд.	2,18 дБ			
				станд. отклон.	8,42 дБ		станд. отклон.	5,47 дБ			
					4753 точек			4753 точек			
Только точки, имеющие разницу				средн. расхожд.	-11,62 дБ		средн. расхожд.	10,60 дБ			
				станд. отклон.	11,74 дБ		станд. отклон.	7,51 дБ			
					1455 точек			976 точек			

Все точки	Спектральные отражения + рассеяние + проникновение здания + горизонтальная дифракция						
	Четкая LOS в %	1-я зона Френеля в %	% выше	% включит.	% приблиз.	% спектр. отражений	% рассеяния
	45,57	8,21	17,99	3,85	8,46	15,93	0,00
	средн. расх.	5,05 дБ					
	станд. откл.	10,45 дБ					
		4753 точек					
Только точки, имеющие разницу	средн. расх.	17,93 дБ					
	станд. откл.	12,54 дБ					
		1338 точек					

Включение дополнительных механизмов распространения может коренным образом повлиять на прогнозы потерь на трассах, в среднем почти на 18 дБ. Хотя это и может оказаться критическим для прогноза покрытия, это оказало бы значительное влияние на рабочие характеристики системы, которой создаются помехи, и поэтому правильное составление модели имеет важное значение.

### 2.3.4 Покрытие с использованием различных частот

Покрытие на частотах 2,4 ГГц, 5,8 ГГц и 28,0 ГГц было рассчитано с использованием всех смоделированных механизмов распространения. На рисунке 8 представлено покрытие, рассчитанное на всех трех частотах. Интересно отметить, что потери для трасс дифрагированных волн значительно выше на частоте в 28 ГГц. Однако потери на трассах для частоты в 28 ГГц во многих местах значительно меньше. Это объясняется действием механизма рассеяния, поскольку неровности поверхности зданий вызывают гораздо большее рассеяние на высоких частотах.

На рисунке 8а) в процентной разбивке представлены преобладающие механизмы распространения на каждой частоте. Спектральные отражения особенно значительны на низких частотах. Рассеяние становится существенными только на частоте 28 ГГц. Рисунки 8б) и 8с) делят результаты рисунка 8а), полученные, соответственно, с отметок на крышах зданий и на уровне улицы.

Целесообразно дополнительно изучить значимость механизмов распространения, как функции дополнительных потерь на трассе, поскольку, хотя тот или иной конкретный механизм может быть доминирующим, по крайней мере для целей покрытия, его может оказаться недостаточно, если дополнительные потери на трассе велики. На рисунке 9 представлен доминирующий механизм

распространения в каждой точке на крышах зданий на каждой частоте. Она более четко показывает влияние рассеяния на высоких частотах.

Основные моменты, на которые следует обратить внимание при изучении этих рисунков, состоят в том, что спектральные отражения и дифракция вокруг могут обеспечить значительное дополнительное покрытие (дополнительные потери на трассе на уровне < 10 дБ) на всех частотах. Другие механизмы (передача через здания, дифракция сверху, рассеяние) имеют гораздо меньшее значение для расчета покрытия. Однако при изучении помех даже трассы со значительным затуханием сигнала становятся важными, особенно в тех случаях, когда должны использоваться схемы модуляции высшего порядка.

РИСУНОК 8

### Доминирующий механизм распространения в сравнении с покрытием

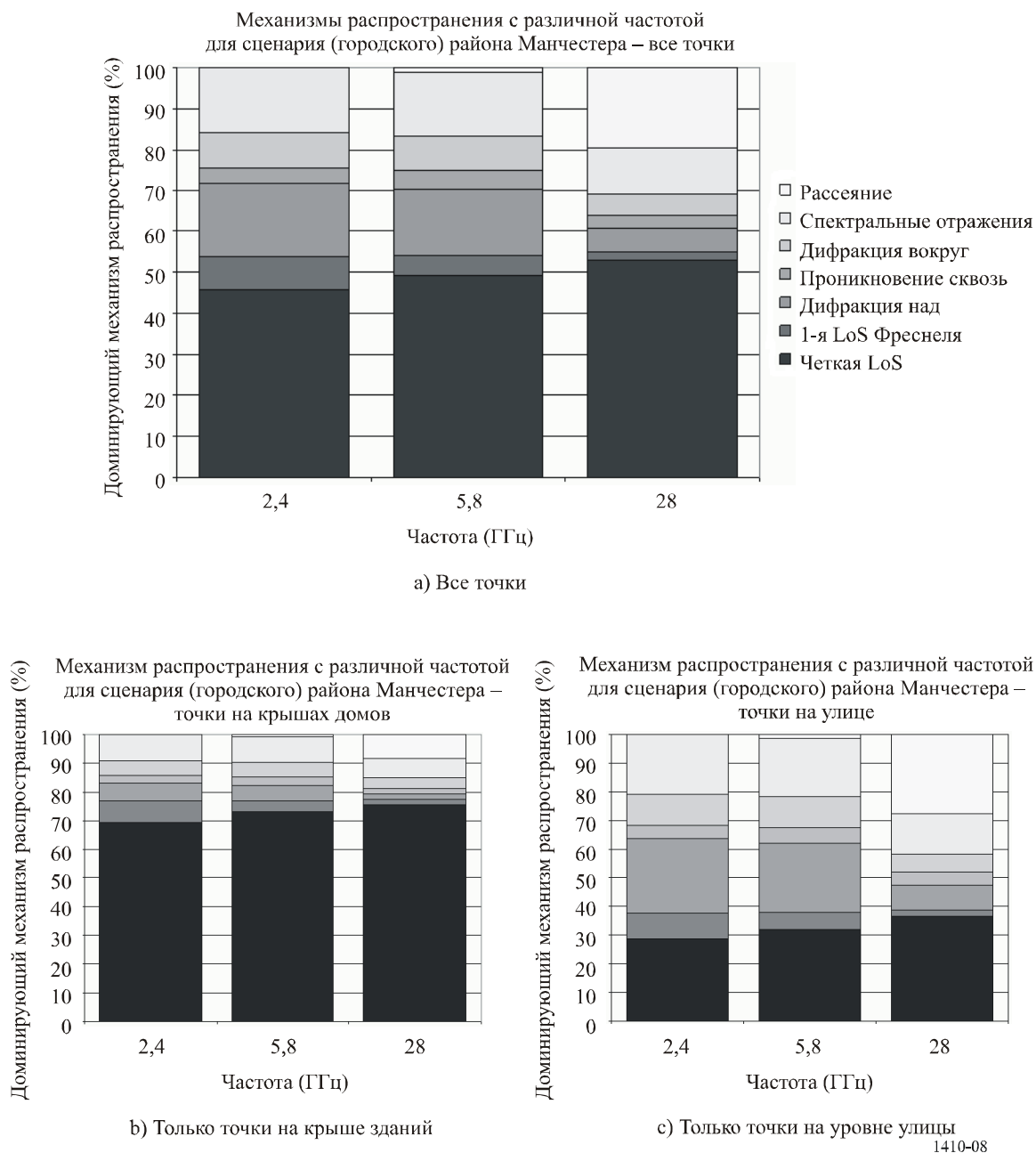
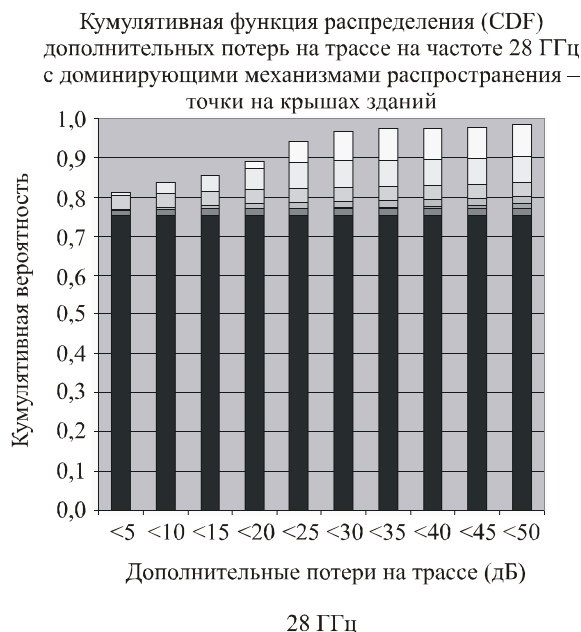
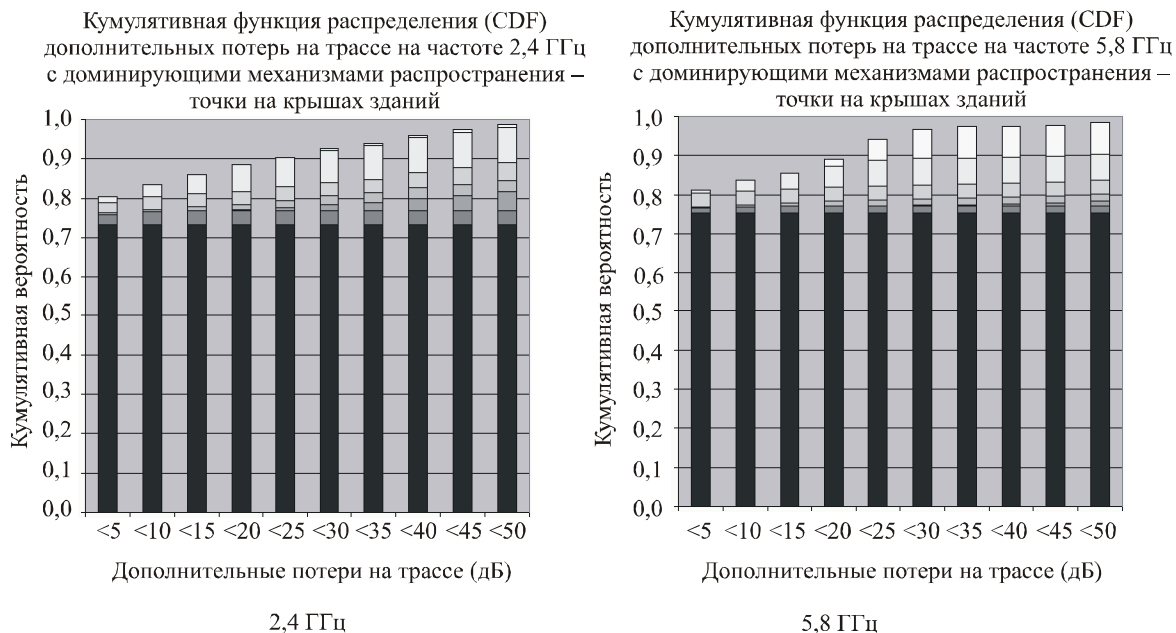




РИСУНОК 9

Дополнительные потери на трассе в зависимости от доминирующих механизмов распространения в точках на крышах зданий



1410-09

### 2.3.5 Краткое обобщение результатов тематического исследования

Тематическое исследование выявило ряд интересных результатов в отношении влияния различных механизмов распространения при расчетах покрытия и помех.

- На пониженных частотах зеркальное отражение и дифракция вокруг объектов могут оказывать значительное влияние на покрытие.
- Выяснилось, что рассеяние является значительным только на частоте 28 ГГц. Дополнительные потери на трассе (обычно  $> 25$  дБ), приписываемые этому механизму, делают его менее важным при обеспечении покрытия, хотя его следует учитывать при оценке помех.
- Включение зеркальных отражений в моделирование помех оказывает значительное влияние на прогнозируемый уровень помех, особенно в тех случаях, когда используются направленные антенны. Для фиксированных сетей с направленными антеннами в сценарии городской местности, для точного прогноза помех необходимо смоделировать отражения.

Важно понять ограничения этого сценария. Прежде всего полученные результаты применимы к городской зоне с передатчиком, расположенным на возвышенности, с большими углами места на небольшие расстояния, которые были рассмотрены. С понижением места расположения передатчика полученные выводы могут измениться. Предполагается, что сценарии для сельской местности и пригорода дали бы значительно отличающиеся результаты в отношении распределения доминирующих механизмов распространения. Отсутствие крупных отражающих объектов значительно уменьшило бы влияние зеркального отражения, хотя рассеяние может оставаться существенным. Для включения сценариев пригорода и сельской местности и правильного моделирования растительности, также очень большое значение имеют данные.

## 2.4 Общие рекомендации

С помощью нескольких баз данных для Северной Европы были выявлены некоторые общие тенденции. Для расчета покрытия использовали метод отслеживания траектории луча (на основе уровня затенения зданиями и растительностью между базовой станцией и помещениями пользователей) в зависимости от высоты антенны передатчика и приемника с учетом преимуществ разнесения нескольких серверов и значимости затенения растительностью. Были отмечены следующие общие моменты:

- Покрытие может в значительной мере зависеть от места, особенно в случае возникновения затенения, обусловленного топографическими особенностями или необычными зданиями вблизи передатчика. Однако в ходе исследований, проведенных в нескольких различных городских/пригородных зонах, были получены значения покрытия 40–60% для ячейки радиусом 2 км при высоте мачты передатчика 30 м.
- Покрытие увеличивается на 1–2% на каждый метр увеличения высоты мачты базовой станции.
- Покрытие увеличивается на 3–4% на каждый метр увеличения высоты мачты в помещении пользователя.
- Сотовая архитектура, позволяющая приемнику выбирать между несколькими базовыми станциями, обеспечивает значительное увеличение покрытия. Например, согласно расчетам с использованием метода отслеживания траектории луча, при высоте антенны передатчика 30 м покрытие в ячейке радиусом 2 км увеличивается от 44% для одной базовой станции до 80% для двух базовых станций и 90% для четырех станций, даже если базовые станции не выбирают специально для достижения хорошей видимости для конкретного приемника.

## 3 Влияние осадков на доступность услуг

После того как будет установлено, что для пользователя имеется LoS без препятствий до базовой станции с достаточным системным запасом при распространении в свободном пространстве, необходимо рассчитать процент времени, в течение которого услуга будет доступна, с учетом влияния осадков.

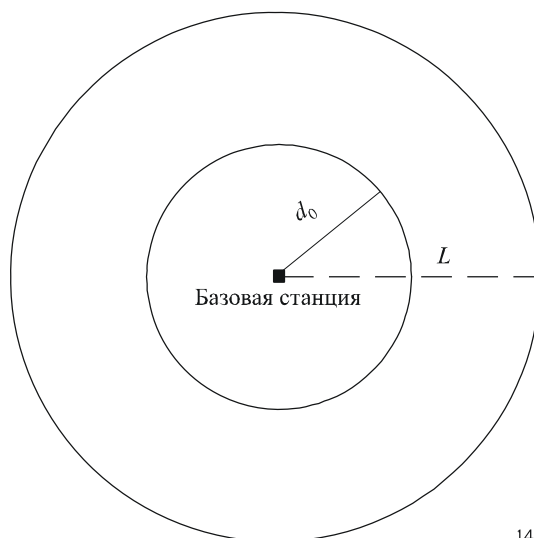
Для любой линии связи в зоне обслуживания базовых станций доступность услуг в условиях осадков можно оценить с использованием методов, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.530.

### 3.1 Одновременное покрытие зоны

Поскольку дождь является неоднородным в двух измерениях в горизонтальном направлении, то одномерную модель для неоднородного дождя на линиях связи пункта с пунктом, приведенную в Рекомендации МСЭ-R P.530, нельзя использовать для случаев связи пункта с зоной. Эту двумерную неоднородность можно учесть путем использования распределения средней интенсивности осадков для исследуемой ячейки. Для ячейки радиусом  $L$  с центральной базовой станцией на рисунке 10 показана эквивалентная зона, определяемая радиусом  $d_0$ , с покрытием в течение заданного процента времени.

РИСУНОК 10

Диаграмма ячейки с центральной базовой станцией, показывающая радиус эквивалентной зоны покрытия в условиях дождя



1410-10

Процедура прогнозирования зоны покрытия была разработана на основе радиолокационных измерений во время дождя в Соединенном Королевстве за двухлетний период.

Для ячейки радиусом  $L$  (км) с центральной базовой станцией и запасом на замирания в системе  $F$  (дБ) на краю зоны:

*Шаг 1:* Определить среднюю по зоне интенсивность осадков  $R_a(p)$ , превышаемую в течение более  $p\%$  времени с помощью уравнения, где  $R$  – точка интенсивности осадков для данной зоны:

$$R_a = (0,317L^{0,06} + 1)R^{1-0,5L^{0,2}}. \quad (27)$$

Примеры этого параметра приведены в таблице 3 для радиолокационных данных, полученных в Соединенном Королевстве. По отношению к точке интенсивности осадков можно отметить, что средняя по зоне интенсивность осадков снижается очень мало при уровне превышения 0,1%, приблизительно на треть – при уровне 0,01% и приблизительно вдвое – при уровне 0,001% для круговой зоны радиусом 2,5 км.

*Шаг 2:* Найти расстояние отсечки для  $d_0$  для  $p\%$  среднего года, численно решив уравнение (27) для  $d$ .

$$k R_a^\alpha(p) d \left(1,5 + (1,1 (2d^{-0,04} - 2,25)) \log(R_a(p))\right) + 20 \log(d/L) = F, \quad (28)$$

где  $k$  и  $\alpha$  – параметры, определяющие удельное затухание в дожде, приведенное в Рекомендации МСЭ-R P.838. Член  $(1,5 + 1,1 (2d^{-0,04} - 2,25)) \log(R_a(p))$  представляет собой коэффициент уменьшения пути для расчета зоны.

*Шаг 3:* Для расстояния отсечки  $d_0 \propto (L, p, F)$  покрытие зоны для этой ячейки равно:

$$C(L, p, F) = 100 \left(\frac{d_0}{L}\right)^2 \quad \% \quad (29)$$

На рисунке 11 приведены, полученные с помощью уравнений (27), (28) и (29), результаты этой процедуры для двух ячеек радиусом 2,5 и 5 км с центральной базовой станцией и для двух систем, использующих вертикальную поляризацию на частоте 42 ГГц, с запасом на затухание в дожде 10 и 15 дБ на краю ячейки. Здесь также предполагается, что усиление антенны передатчика является одинаковым для всех пользователей. В этих расчетах учтены потери в свободном пространстве (уравнение (28)).

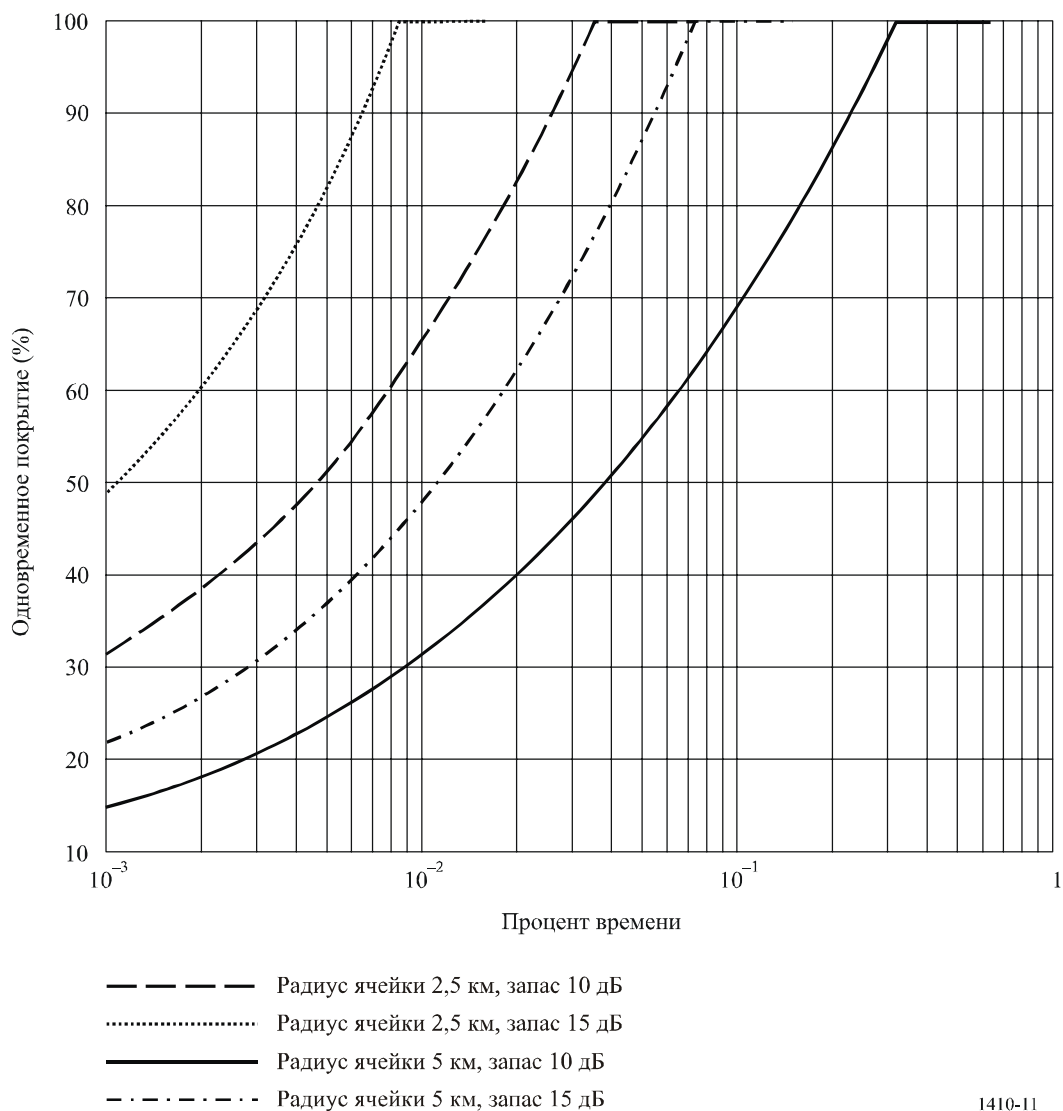
ТАБЛИЦА 3

Интенсивность осадков в пункте и средняя интенсивность по зоне, полученная по данным радиолокационных измерений в Соединенном Королевстве в течение двух лет

Процент времени	Интенсивность осадков в пункте, $R$ (мм/час)	Средняя по зоне $R$ (мм/час)	
		Радиус = 2,5 км	Радиус = 5 км
0,001	65,6	36,0	33,0
0,003	46,2	29,0	23,4
0,01	29,9	19,4	17,1
0,03	18,1	16,3	12,6
0,1	9,8	9,5	8,5
0,3	5,0	4,9	4,8
1	2,0	2,1	2,1

РИСУНОК 11

Применение процедуры в пункте 1,5 в. д., 51 с. ш.



### 3.2 Улучшение за счет разнесения трасс

Осадки значительно изменяются во времени и пространстве как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. Для отдельной линии связи между двумя терминалами эта изменчивость отражается в используемой в настоящее время процедуре моделирования, например, путем использования эффективной длины трассы. Предположим, что пользователь может подключиться в любой момент времени к двум или более базовым станциям. В этом пункте описывается, насколько увеличится доступность услуг, если будет установлена такая система.

Рассматривается звездообразная сеть с общим узлом, состоящая из двух передатчиков и одного приемника, в которой длина двух трасс считается одинаковой, а угловое разнесение варьируется в пределах  $0^\circ$ – $360^\circ$ .

В связи с неоднородностью дождя в горизонтальном направлении статистика затухания для одной трассы и двух разнесенных трасс оказывается различной. На рисунке 12 приведена типовая статистика затухания для одной незащищенной трассы и сочетания разнесенных трасс. Улучшение за счет углового разнесения, которое можно представить как улучшение за счет разнесения  $I(A)$  или как выигрыш за счет разнесения  $G(A)$ , определяется следующим образом:

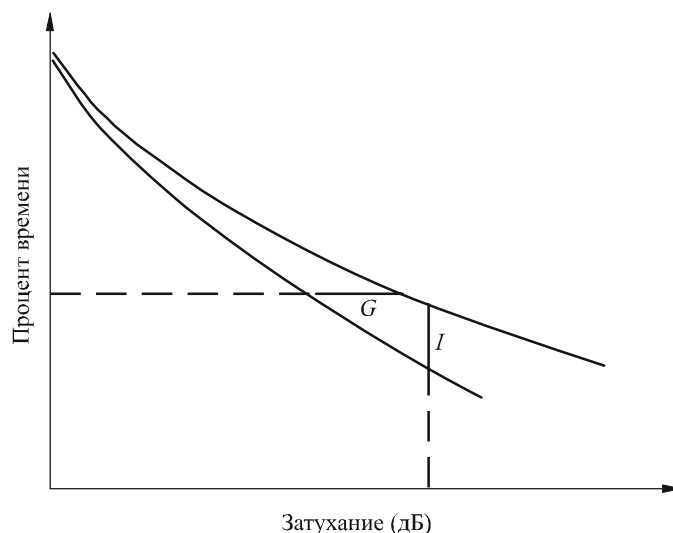
$$I(A) = \frac{P(A)}{P_d(A)} \quad (30)$$

$$G(A) = A(t) - A_d(t), \quad (31)$$

где  $P_d(A)$  – процент времени для сочетания разнесенных трасс с глубиной замирания больше  $A$ , а  $P(A)$  – процент времени для незащищенной трассы. Аналогично,  $A_d(t)$  – глубина замирания для сочетания разнесенных трасс, имеющего места в течение процента времени  $t$ , а  $A(t)$  – эта величина для незащищенной трассы.

РИСУНОК 12

Пример статистики затухания для трассы с угловым разнесением



Выигрыш за счет разнесения  $G$  рассчитывают с использованием следующих шагов:

*Шаг 1:* Задать угол  $\theta$  между двумя трассами длиной  $d_{max}$  и  $d_{min}$ .

*Шаг 2:* Рассчитать  $G_{sym}$ :

$$G_{sym} = a_g d_{max}^{b_g}$$

в зависимости от  $d_{max}$ , используя коэффициенты  $a_g$  и  $b_g$  из приведенной таблицы 4 для процентов доступности линий связи с разной доступностью.

ТАБЛИЦА 4

## Значения коэффициентов для разной доступности

Доступность (%)	$a_g$	$b_g$
99	0,123	1,366
99,5	0,218	1,308
99,7	0,342	1,259
99,9	0,648	1,173
99,95	0,810	1,165
99,97	1,132	1,169
99,99	2,041	1,077

Шаг 3: Рассчитать коэффициент асимметрии пути  $a$  из следующего выражения:

$$a = c \left( \frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{-d}, \quad (32)$$

где коэффициенты  $c$  и  $d$  приведены в таблице 5.

ТАБЛИЦА 5

Значения коэффициентов  $c$  и  $d$  для разной доступности

Доступность (%)	$c$	$d$
99	0,907	2,852
99,5	0,946	2,976
99,7	0,969	2,761
99,9	0,971	2,821
99,95	0,930	2,347
99,97	0,905	2,316
99,99	1,000	2,270

Для трасс равной длины установить  $a = 1$ .

Шаг 4: Выигрыш за счет разнесения  $G$  при желаемой доступности равно:

$$G = G_{sym} \operatorname{asin} \left( \frac{\theta}{2} \right)^x \quad \text{дБ},$$

где  $x$  определяется следующим выражением:

$$x = 0,87 \ln \left( \frac{d_{max}}{d_{min}} \right) + 0,55 \quad \text{для } 1 \leq (d_{max}/d_{min}) \leq 2.$$

Улучшение за счет разнесения  $I$  рассчитывают с использованием следующих шагов:

*Шаг 1:* Задать угол  $\theta$  между двумя трассами  $d_{max}$  и  $d_{min}$ .

*Шаг 2:* Рассчитать  $I_{sym}$  из следующего выражения:

$$I_{sym} = 10^{(a_i L^{b_i})} - 1,$$

где  $a_i$  и  $b_i$  приведены в таблице 6 для затухания с превышением для разных процентов времени.

ТАБЛИЦА 6

**Значения коэффициентов для разной глубины замирания с превышением в зависимости от процента времени  $A$**

Время (%)	$a_i$	$b_i$
1	0,082	0,491
0,5	0,114	0,431
0,3	0,106	0,535
0,1	0,155	0,559
0,05	0,196	0,566
0,03	0,324	0,406

*Шаг 3:* Рассчитать коэффициент асимметрии пути  $a$  из следующего выражения:

$$a = c \left( \frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{-d}, \quad (33)$$

где коэффициенты  $c$  и  $d$  приведены в таблице 7.

ТАБЛИЦА 7

**Значения коэффициентов  $c$  и  $d$  для разной глубины замирания с превышением для заданного процента времени**

Время (%)	$c$	$d$
1	0,851	2,355
0,5	0,961	2,493
0,3	0,882	2,288
0,1	0,768	2,631
0,05	0,762	2,198
0,03	0,858	2,427

Для трасс равной длины установить  $a = 1$ .

Шаг 4: Улучшение за счет разнесения  $I$  при желаемом затухании равно:

$$I = 1 + I_{sym} \operatorname{asin}\left(\frac{\theta}{2}\right)^x,$$

где  $x$  определяется следующим выражением:

$$x = 0,61 \ln\left(\frac{d_{max}}{d_{min}}\right) + 0,84 \text{ для } 1 \leq (d_{max}/d_{min}) \leq 2$$

Следует отметить, что эти методы были разработаны на основе полученных при радиолокационных наблюдениях в Соединенном Королевстве значений интенсивности осадков.

#### 4 Искажение в канале распространения

В этом пункте рассматриваются мгновенные эффекты в канале распространения, вызываемые движением растительного покрова и многолучевостью за счет зданий и рельефа местности. Ввиду малого количества имеющихся сегодня данных в качестве ориентира указаны результаты проведенных измерений. Сведения об изменчивости сигнала и стандартном отклонении при распространении через колеблющийся растительный покров приведены в Рекомендации МСЭ-R P.833.

##### 4.1 Избирательное по частоте затухание за счет растительного покрова

Для исследования возможности возникновения в канале избирательного по частоте замирания были проведены измерения с использованием блока фильтров при передаче в полосе 34 МГц. Блок фильтров включал восемь каналов с шириной полосы 1,6 МГц (по уровню  $-3$  дБ), разделенных 3 МГц и размещенных в середине канала.

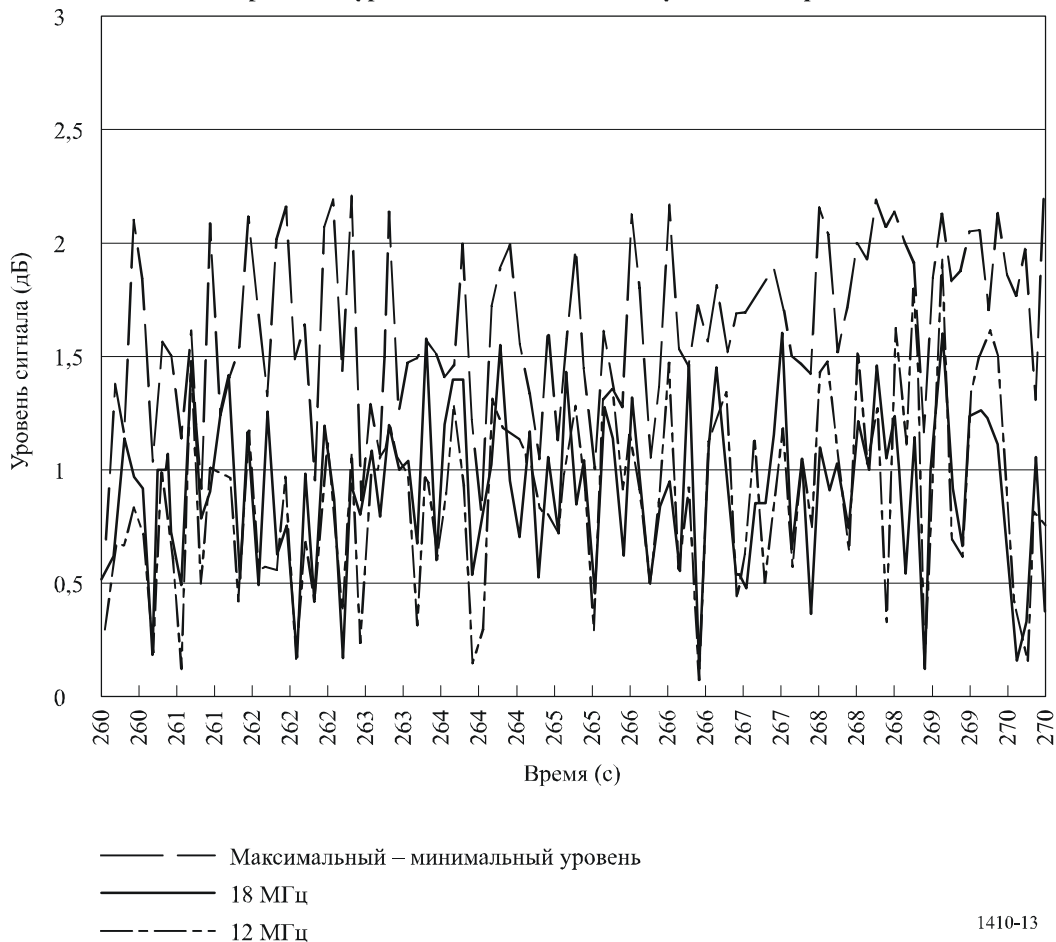
Измерения проводили за березой на расстоянии 15 м. Выборку осуществляли с интервалом 100 мс. Поскольку во время измерений не было ветра, условия ветра моделировались с помощью привязанных к дереву веревок. На рисунке 13 приведено сравнение уровня сигнала в каналах в условиях сильного ветра. Небольшой уровень изменений, наблюдаемых в канале, позволяет предположить, что значительного избирательного по частоте замирания нет. Следовательно, изменения уровня сигнала со временем могут быть связаны с изменением препятствия или плотности ветвей и листьев между приемником и передатчиком либо с многолучевым распространением при очень малых различиях времени распространения.

Для дальнейшей проверки наблюдений был поставлен эксперимент с использованием сумматора максимальной мощности (MPC) и двух отдельных антенн, разнесенных на 72 см. На частоте 42 ГГц осуществлялась испытательная телевизионная передача Экспертной группы по кинематографии-2 (MPEG-2) с использованием формата спутникового цифрового телевидения (DVB-S) с квадратурной фазовой манипуляцией (КФМн) уровня 1/2 с упреждающей коррекцией ошибок (FEC)). Сигналы с каждой антенны, а также результирующие сигналы от сумматора максимальной мощности подавали в три телевизионные приставки DVB-S и на видеомониторы. Геометрия была выбрана так, чтобы обе антенны принимали сигналы через движущиеся ветви дерева. В каждой системе DVB-S для отдельной антенны регулярно происходила потеря пакетов. Коэффициент потерь пакетов был слишком велик, чтобы его можно было скорректировать с помощью декодера, и приводил к частой потере изображения. В отличие от этого, для сигнала сумматора максимальной мощности коэффициент потерь пакетов был существенно ниже, и декодер MPEG-2 был способен обеспечить компенсацию, поддерживая стабильность изображения.



РИСУНОК 13

## Сравнение уровня сигнала в каналах в условиях ветра



1410-13

## 4.2 Многолучевое распространение за счет отражения

### 4.2.1 Результаты метода отслеживания траектории луча

Моделирование с использованием отслеживания траектории луча показало, что проблема многолучевого распространения незначительна в условиях работы системы. Наличие у антенны приемника очень узкого луча приводит к тому, что большая часть многолучевых сигналов сильно затухает. В приемник попадают со значительным уровнем только низкие падающие со скользящим углом лучи с соседних крыш и земли. В результате этого установленный на основе модели разброс значений задержки очень невелик.

При моделировании с использованием отслеживания траектории луча получаемые в результате дифракции лучи не учитывались, но в более ранней работе было установлено, что число положений, в которых могут использоваться дифрагированные лучи, невелико, и поэтому, вероятно, имеется мало мест, в которых дифрагированные лучи служат основным источником помех.

Пример расчетов методов отслеживания траектории луча разброса задержки для разных местоположений приемника с помощью большой базы данных (из Оксфорда в Соединенном Королевстве) дает крайне малые значения из-за очень низких уровней многолучевости. Среднеквадратичный разброс задержки оказался около 0,01 нс, что приблизительно соответствует когерентной ширине полосы 15 ГГц. Это не должно создавать трудностей для широкополосной системы радиодоступа. Маловероятно, что истинный разброс среднеквадратичной задержки столь мал в действительности из-за упомянутых выше дифрагированных лучей, но когерентная ширина полосы до 5 ГГц все же может быть реалистичной. Стандартное отклонение разброса среднеквадратичной задержки составляет около 0,01 нс.

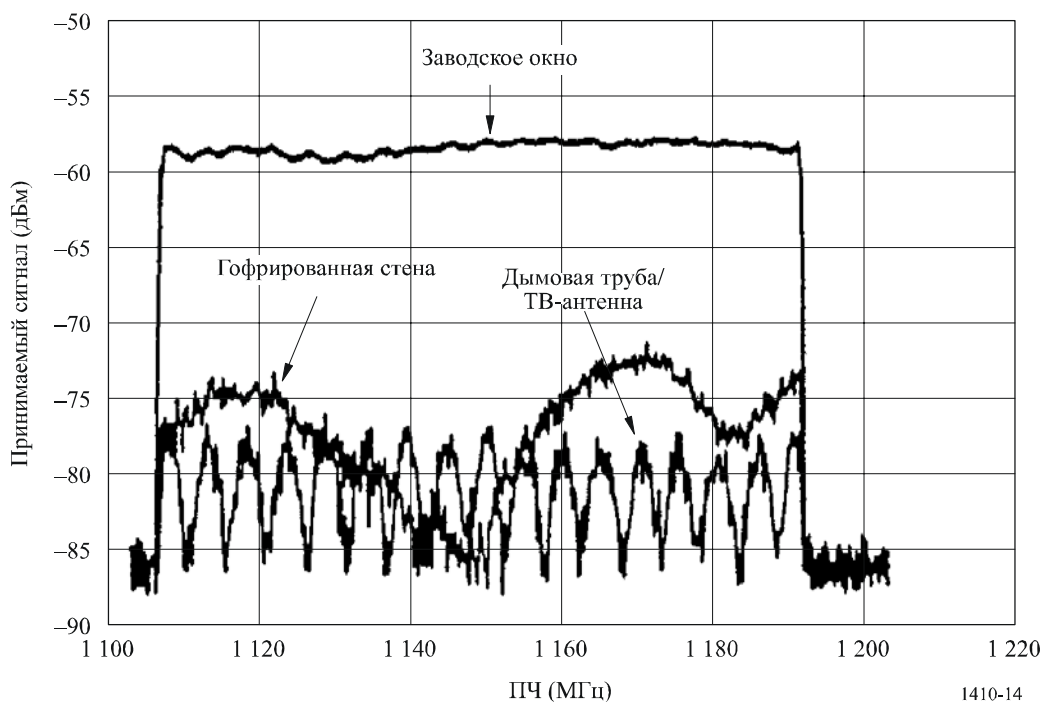
#### 4.2.2 Результаты измерений

Отражение от зданий можно рассматривать одновременно как возможность покрытия зон отсутствия приема сигнала и как вредное многолучевое распространение. Некоторые наблюдения с использованием развертки по частоте на 80 МГц показали, что с помощью включения отраженных сигналов можно получить увеличение на 9% числа мест приема достаточного для покрытия сигнала. Однако следует отметить, что при использовании отраженных сигналов для обеспечения обслуживания возникает ряд проблем. Во-первых, сигнал должен быть стабильным, а это означает, что падение сигнала на отражающий объект должно происходить на трассе LoS. Если какая-либо часть трассы проходит через растительность или по пути, который может быть заблокирован движущимся транспортом, то результирующий сигнал будет меняться со временем. Во-вторых, сам отражающий объект должен быть постоянным и стабильным.

Протяженность и неровность отражающей поверхности здания оказывает решающее влияние на частотные характеристики канала. На рисунке 14 приведены измеренные частотные характеристики канала для трех разных отраженных сигналов: от окна завода, от дымовой трубы дома ленточной застройки (включая установленную на ней телевизионную антенну типа волнового канала) и от гофрированной металлической стены большого здания магазина. Следует отметить, что гофрированная стена последнего здания давала расширенное отражение в угол, а не отдельное зеркальное отражение. Расстояние от этих объектов до передатчика составляло, соответственно, 1,34 км, 1,57 км и 616 м.

РИСУНОК 14

Частотные характеристики для измеренных отражений от трех разных объектов



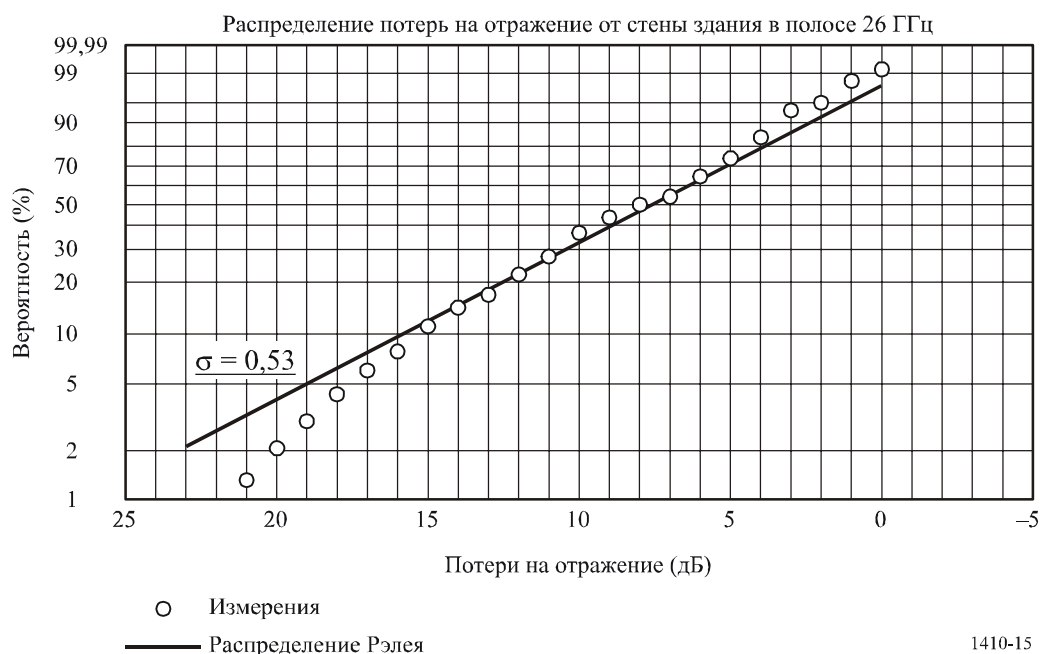
Можно видеть, что заводское окно дает достаточно плоскую частотную характеристику, поскольку оно действует как плоское зеркало и имеет только одну компоненту зеркального отражения. Однако гофрированная стена и дымовая труба дают четкие пульсации, соответствующие разности длины пути (в предположении модели двух лучей) в 6 и 60 м, соответственно. Для отражения от дымовой трубы большая длина пути может быть обусловлена сложением с отражением от другого объекта, находящегося приблизительно в 30 м позади трубы. В случае гофрированной стены разница длины пути в 6 м может получаться от разных частей самой стены, поскольку отраженные сигналы может давать все здание, а не только небольшой участок зеркального отражения.

Измерения широкополосного спектра были осуществлены в пригородной зоне как в полосах частот 5 ГГц, так и 25 ГГц. Занятая полоса частот спектра передачи равняется 26 МГц, а 10 МГц диапазон центральной части спектра почти ровный. В каждом спектре максимальный разброс внутриполосной амплитуды может быть рассчитан на основе максимального и минимального уровней в диапазоне 10 МГц диапазоне центральной части спектра. При предположении модели двухволновой помехи соотношение ( $D/U$ ) волны-D такое, как прямая волна, и волны-U такой, как отраженная волна, является важным фактором при оценке разброса внутриполосной амплитуды. На разброс внутриполосной амплитуды в терминале влияет экранирование, вызываемое препятствиями, например, окружающими домами и деревьями. Предположив, что уровень волны-U постоянный, можно сказать, что значение  $D/U$  трассы распространения равно 20–30 дБ. Это указывает на то, что, если мы используем антенну терминала с усилением антенны приблизительно в 15 дБи и получаем экранирование свыше 20 дБ, то колебание внутриполосной амплитуды имеет чрезмерный разброс. Усиление направленной антенны влияет на уровень подавления мешающих волн. Можно предположить, что значение  $D/U$  равно 50 дБ для антенны с усилением для 32 дБи и 30 дБ для антенны с усилением для 12 дБи. Разница в усилениях этих двух антенн соответствует разнице в вышеупомянутых значениях  $D/U$ .

Измерения с разверткой по частоте для сигнала с вертикальной поляризацией на частоте 26 ГГц при углах отражения от  $87,5^\circ$  до  $89^\circ$  (т. е. почти перпендикулярно к поверхности стены) дали медианное затухание в 7,5 дБ. Передатчик и приемник находились в одном месте. Расстояние до стены менялось в интервале от 37 до 402 м. Использовались четыре здания со стенами из стекла, керамической плитки и металла с неровностью поверхности в интервале от 3 до 75 см. Следует иметь в виду, что вектор электрического поля был параллелен стене. Кумулятивное распределение потерь на отражение показано на рисунке 15. Было определено, что стандартное отклонение расхождения в измерениях, касающихся распределений Релея, составляет  $\sigma = 0,53$  дБ.

РИСУНОК 15

Кумулятивное распределение измеренных потерь на отражение от стены здания на частоте 26 ГГц



## 5 Помехи

Сотовые системы радиосвязи спроектированы так, чтобы добиться компромисса между схемой повторного использования частот и отношением несущая/помеха ( $C/I$ ). Для удовлетворительной работы определенной системы, т. е. в соответствии с заданными характеристиками, может оказаться необходимым минимальное отношение  $C/I$ .

Если задано требуемое минимальное отношение  $C/I$ , легко получить соответствующую требованиям схему регулярного повторного использования частоты. Однако, чтобы обеспечить требуемое качество работы системы радиодоступа, следует учитывать особенности рельефа и тщательно выбирать подходящее местоположение для базовой станции.

В большинстве случаев из-за антенн терминалов с узким лучом может быть затронуто только небольшое число пользователей. Ширина луча составляет порядка  $2^\circ$ – $3^\circ$ . Пользователи, которые могут быть затронуты, могут воспользоваться моделями из Рекомендаций МСЭ-R P.452 и МСЭ-R P.530 для оценки процента времени, в течение которого возникают создаваемые мешающие базовой станцией усиленные вредные сигналы не на трассе LoS и трассе LoS, соответственно. Однако для подтверждения прогнозируемых значений выше 37 ГГц данных нет.

Проблему помех оценивали с использованием данных для 111 мест, изучавшихся в ходе кампании по измерению зон покрытия в Соединенном Королевстве. Возможным источником помех был сочтен второй передатчик. Во всем массиве данных только в одном положении обнаружили сигнал от мешающего передатчика выше порога шума в пределах ширины луча антенны, нацеленной на полезный передатчик, и даже в этом случае отношение полезного сигнала к мешающему составляло 15 дБ. Это, как представляется, подтверждает тот факт, что помехи между ячейками, вероятно, будут иметь небольшое значение из-за узкого луча антенны приемника.

---