

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.1410-3

**Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования,  
требующиеся для проектирования наземных широкополосных систем  
радиодоступа в миллиметровом диапазоне, работающих  
в полосе частот около 20–50 ГГц**

(Вопрос МСЭ-R 203/3)

(1999-2001-2003-2005)

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

а) что для надлежащего планирования наземных широкополосных систем радиодоступа в миллиметровом диапазоне необходимо иметь соответствующие данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования;

б) что Рекомендации, разработанные для проектирования отдельных линий связи в миллиметровом диапазоне, не охватывают аспекты зон,

*рекомендует,*

**1** чтобы при проектировании наземных широкополосных систем радиодоступа в миллиметровом диапазоне, работающих в полосе частот около 20–50 ГГц, использовались данные 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 частным пользователям, а также небольшим коммерческим предприятиям. Все чаще рассматриваются технические решения с использованием радиосвязи в миллиметровом диапазоне волн для организации систем доставки, и эти системы сегодня уже имеются на рынке. В настоящее время рассматриваются и внедряются несколько таких систем, например локальная многоточечная система распределения, локальная многоточечная система связи и система "точка–множество точек" (P-MP). В совокупности эти системы можно назвать системами широкополосного беспроводного доступа (BWA).

В связи с быстрым развитием систем радиосвязи возникает потребность в хорошем руководстве по проектированию, касающемся вопросов распространения радиоволн. В настоящей Рекомендации представлен ряд результатов измерений распространения радиоволн для радиосвязи в миллиметровом диапазоне и приведены несколько методов прогнозирования.

**2 Охват зоны**

При планировании сотовой системы связи оператор должен со всей тщательностью выбирать местоположение базовой станции и высоту над уровнем земли, с тем чтобы иметь возможность предоставления услуг планируемому 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 пункте представлена статистическая модель затенения зданиями, основанная на очень простых характеристиках расположенных в зоне зданий, и приведено руководство, основанное на детальных расчетах. В нем также приведена модель затухания радиоволн за счет растительного покрова и некоторые простые правила проектирования.

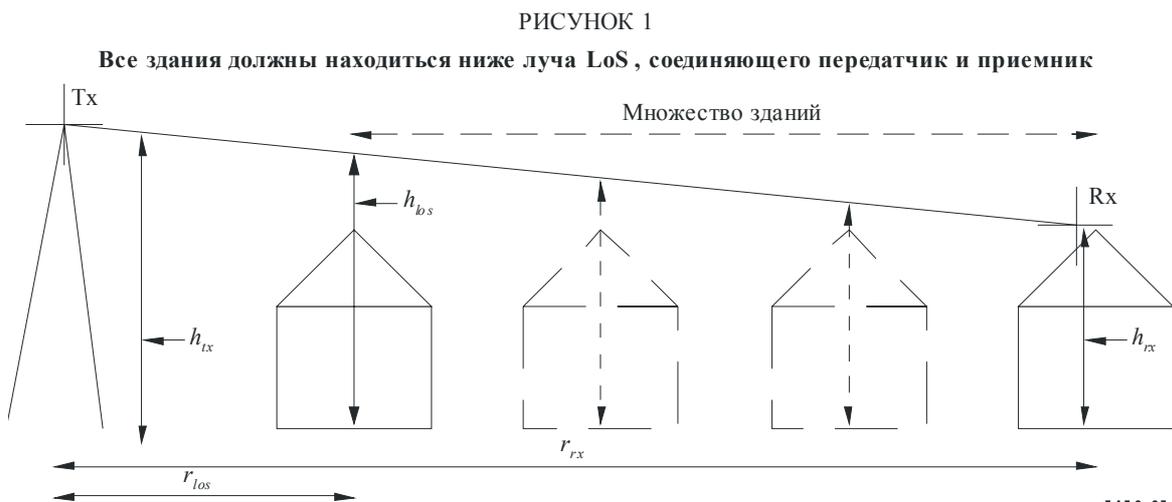
## 2.1 Затенение зданиями

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 соответствующие базы данных отсутствуют, и в этом случае рекомендуют использовать статистическую модель, рассмотренную в п. 2.1.2.

### 2.1.1 Требования к методам отслеживания траектории луча

Точный прогноз охвата можно получить при использовании методов отслеживания траектории луча в тех зонах, где имеется база данных о территории, занятой сооружениями. Применение высоких частот и трасс небольшой длины позволяет использовать приближение геометрической оптики с представлением прямыми линиями.

При оценке охвата 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 ограничивает 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. При этом 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 о зданиях 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 надо 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 и 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. Как вариант, при определении LoS можно использовать растровую базу данных с отметками высоты того типа, которую получают с самолета с помощью бортового радара с синтезированным раскрывом 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 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 (1). 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:

$$h_{los} = h_{tx} - \frac{r_{los}(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}}, \quad (1)$$

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:

$$P(LoS) = \prod_{b=1}^{b_r} P(\text{высота здания} < h_{los}), \quad (2)$$

где  $b_r$  – число пересекаемых зданий.

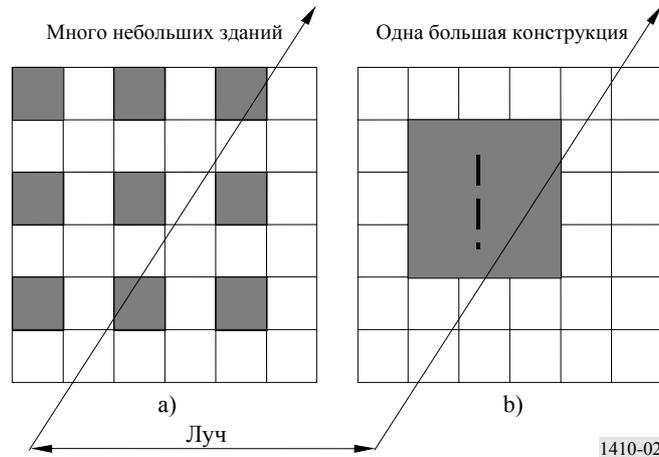
Для этой простой модели требуются три параметра:

- $\alpha$ : 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 (моде). Причины различия  $\alpha$  и  $\beta$  иллюстрируются на рисунке 2. Как на рисунке 2а), так и на рисунке 2б) охватываемые площади одинаковы и, следовательно, одинаковы значения  $\alpha$ , но на рисунке 2а) можно ожидать большего взаимодействия луча, чем на рисунке 2б). Однако одно отношение  $\alpha$  не позволяет отличить две схемы, приведенные на рисунке 2. Если здания на рисунках 2а) и 2б) имеют одинаковую высоту, вероятность гашения для множества небольших зданий будет существенно ниже, чем гашения для одного большого здания.

РИСУНОК 2

Два сценария с одинаковой зоной охвата, но с разным числом взаимодействий луча



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  $\gamma$ :

$$P(h) = \frac{e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}}}{\gamma^2} h \quad (3)$$

### 2.1.3 Алгоритм и расчет

При заданных  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  охват LoS рассчитывают следующим образом.

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

$$b_1 = \sqrt{\alpha \beta} \quad (4)$$

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

$$b_r = \text{floor}(r_{rx} b_1), \quad (5)$$

где функция floor введена для обеспечения того, чтобы в уравнение (2) входило целое число членов.

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

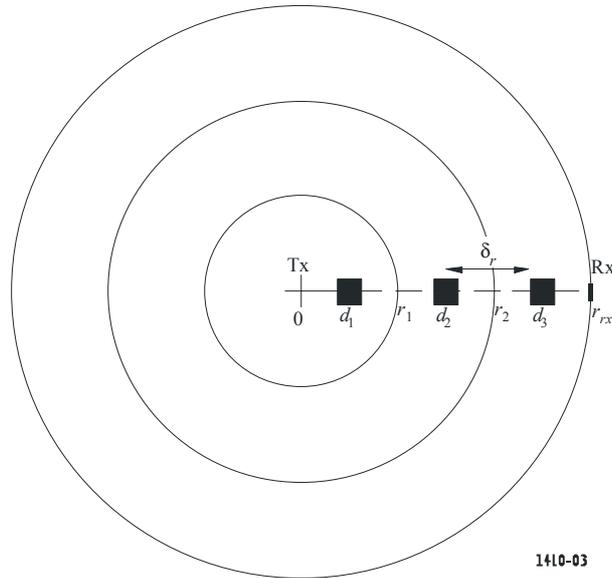
*Шаг 1:* Рассчитайте число зданий  $b_r$  между точками Tx и Rx с использованием уравнения (5).

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

$$d_i = (i + 1/2) \delta_r \quad i \in \{0, 1, \dots, (b_r - 1)\}, \quad (6)$$

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

РИСУНОК 3  
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 (1).

$$h_i = h_{tx} - \frac{d_i(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} P_i &= \int_0^{h_i} P(h) dh \\ &= 1 - e^{-h_i^2 / 2\gamma^2} \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$P_{los,i} = \prod_{j=0}^i P_j \quad j \in \{0, \dots, i\} \quad (9)$$

*Шаг 6:* Результирующий охват 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.

$$W_i = 2i + 1 \quad (10)$$

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

$$CP_{r_{rx}} = \frac{\sum_{i=0}^{b_r-1} P_{los,i} W_i}{b_r^2} \quad (11)$$

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 устанавливаются 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 охвата в сравнении с результатами, полученными с использованием отслеживания траектории луча на базе реальных данных, см. п. 2.1.4. Распределение Рэлея для высоты зданий оказалось точным для некоторых выборок данных при рассмотрении ограниченной зоны, например небольшого города. Кроме того, для получения результатов охвата, описанных в п. 2.1.4, необходимо шаг за шагом использовать модель расположения зданий и просвета трассы, как указано в приведенной выше процедуре.

#### 2.1.4 Примеры прогнозирования охвата

Аппроксимация Рэлея была получена для кумулятивного распределения высоты крыш в пригородном районе в Соединенном Королевстве (Мальверн). 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 4 и 5 приведены полученные с помощью модели результаты. На рисунке 4 показан охват в зависимости от высоты передатчика, а на рисунке 5 – в зависимости от высоты приемника.

Модель позволяет получить прогнозы с той же основной формой и общим уровнем охвата, как и результаты, получаемые с помощью подробного моделирования по методу отслеживания траектории луча. Эта модель полезна тем, что с ее помощью можно сделать прогноз охвата 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 охвата в неизвестном месте. Модель можно использовать не только для оценки охвата в отдельной ячейке, но и, объединив результаты для многих ячеек, для получения охвата в больших сетях, включая влияние занесения.

РИСУНОК 4

Полученный с помощью модели кумулятивный охват для приемника на высоте 7,5 м и передатчика на высоте 5, 10, 15, 20, 25 и 30 м

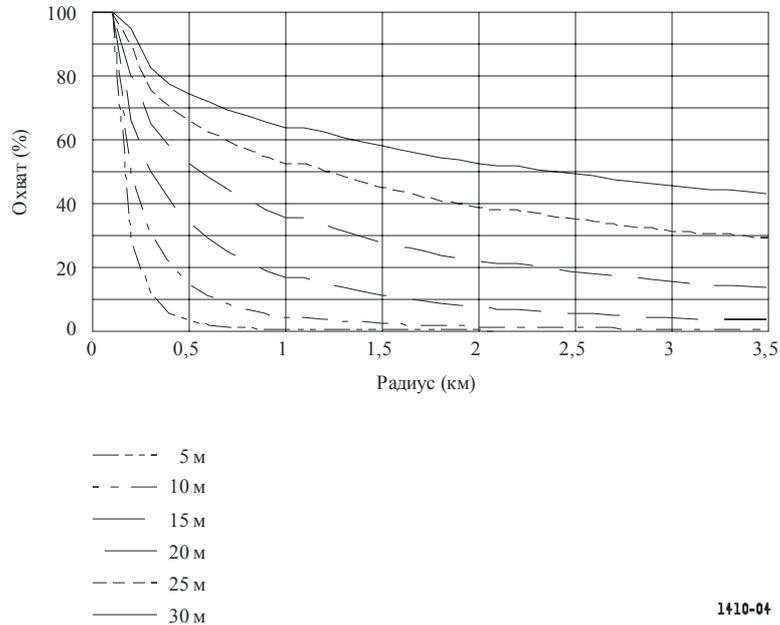
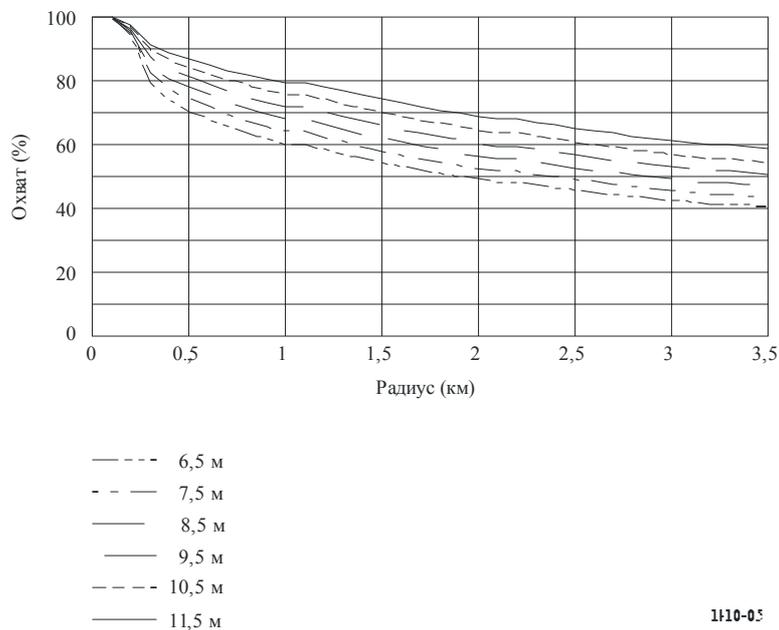


РИСУНОК 5

Полученный с помощью модели кумулятивный охват для передатчика на высоте 30 м и приемника на высоте 6,5, 7,5, 8,5, 9,5, 10,5 и 11,5 м



### 2.1.5 Увеличение охвата при использовании двух и более базовых станций

Сотовая архитектура, позволяющая приемнику выбирать между несколькими базовыми станциями, обеспечивает значительное увеличение охвата. Например, согласно расчетам с использованием метода отслеживания траектории луча, при высоте антенны передатчика 30 м охват 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 (9). Тогда вероятность наличия хотя бы одной трассы прямой видимости при заданных  $m$  возможных базовых станциях равна:

$$P_{los,i} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - P_{los,i,k}) \quad (12)$$

Заменяв  $P_{los,i}$  в уравнении (9) на уравнение (12) в описанной в п. 2.1.3 процедуре, можно рассчитать охват 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 Общие рекомендации

С помощью нескольких баз данных для Северной Европы были выявлены некоторые общие тенденции. Для расчета охвата 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:

- Охват 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 охвата 40–60% для ячейки радиусом 2 км при высоте мачты передатчика 30 м.
- Охват увеличивается на 1–2% на каждый метр увеличения высоты мачты базовой станции.
- Охват 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 охвата. Например, согласно расчетам с использованием метода отслеживания траектории луча, при высоте антенны передатчика 30 м охват 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.

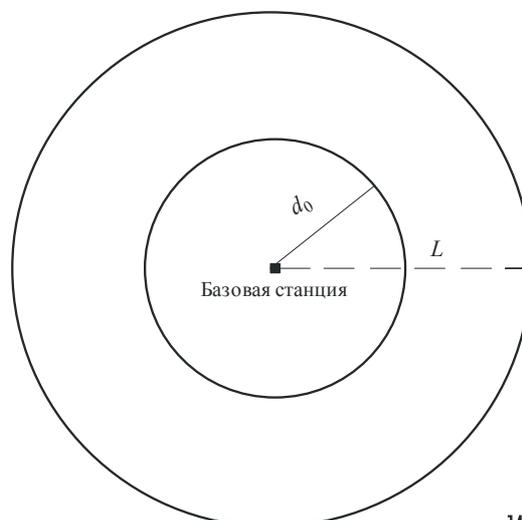
Для любой линии связи в зоне обслуживания базовых станций доступность услуг в условиях осадков можно оценить с использованием методов, приведенных в Рекомендации МСЭ-R P.530.

#### 3.1 Одновременный охват зоны

Поскольку дождь является неоднородным в двух измерениях в горизонтальном направлении, то одномерную модель для неоднородного дождя на линиях связи "точка-точка", приведенную в Рекомендации МСЭ-R P.530, нельзя использовать для случаев связи "точка-зона". Эту двумерную неоднородность можно учесть путем использования распределения средней интенсивности осадков для исследуемой ячейки. Для ячейки радиусом  $L$  с центральной базовой станцией на рисунке 6 показана эквивалентная зона, определяемая радиусом  $d_0$ , с охватом в течение заданного процента времени.

РИСУНОК 6

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



Процедура прогнозирования зоны охвата 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 сети дождемеров, радиолокатора для измерения осадков или с помощью аналитических моделей ливневого дождя. Примеры этого параметра приведены в таблице 2 для радиолокационных данных, полученных в Соединенном Королевстве. По отношению к точке интенсивности осадков можно отметить, что усредненная 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 (13) для  $d$ .

$$k R_a^\alpha(p) d \left(1,5 + \left(1,1 (2d^{-0,04} - 2,25)\right) \log(R_a(p))\right) + 20 \log(d/L) = F, \quad (13)$$

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  $d_0 \propto (L, p, F)$  охват зоны для этой ячейки равен:

$$C(L, p, F) = 100 \left(\frac{d_0}{L}\right)^2 \quad \% \quad (14)$$

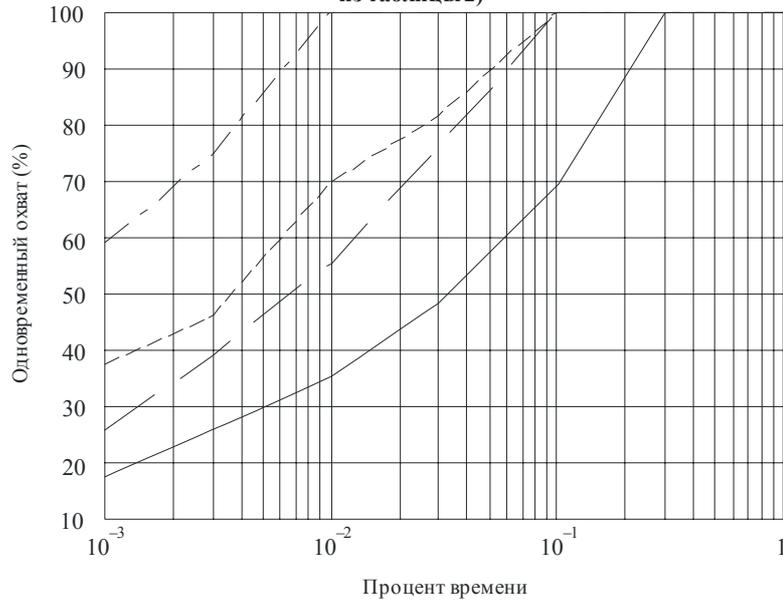
В таблице 2 приведен пример усредненных по зоне осадков, полученных с помощью радиолокационных наблюдений в Соединенном Королевстве. Как интенсивность осадков в точке, так и усредненные по зоне значения получены только из радиолокационных данных. Следует отметить, что усредненная по зоне интенсивность осадков уменьшается с увеличением зоны усреднения. На рисунке 7 приведены полученные с помощью этой процедуры результаты 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.

ТАБЛИЦА 2

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

Процент времени	Интенсивность осадков в точке, $R$ (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 7  
 Применение процедуры (используя данные об интенсивности осадков  
 из таблицы 2)



	Радиус ячейки (км)	Запас (дБ)
— — — —	2,5	10
- - - -	2,5	15
— — — —	5	10
— — — —	5	15

1410-07

### 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°–360°.

В связи с неоднородностью дождя в горизонтальном направлении статистика затухания для одной трассы и двух разнесенных трасс оказывается различной. На рисунке 8 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:

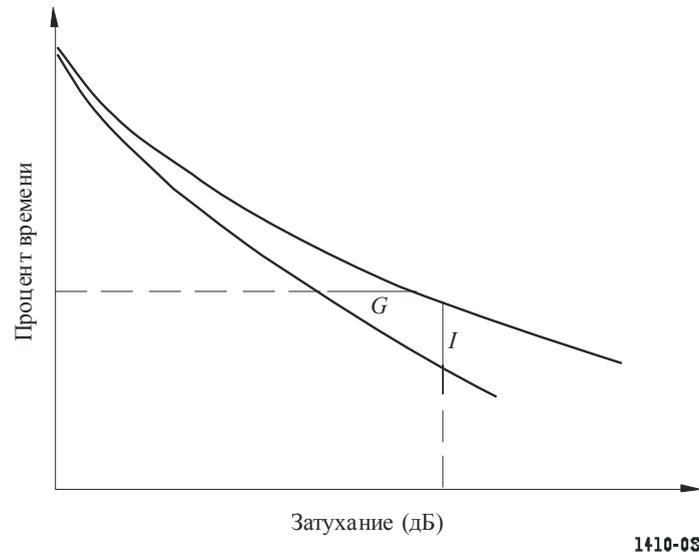
$$I(A) = \frac{P(A)}{P_d(A)} \quad (15)$$

$$G(A) = A(t) - A_d(t), \quad (16)$$

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 8

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 3 для процентов доступности линий связи с разной доступностью.

ТАБЛИЦА 3

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:

$$a = c \left( \frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{-d}, \quad (22)$$

где коэффициенты  $c$  и  $d$  приведены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4

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:

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

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 5 для затухания с превышением для разных процентов времени.

ТАБЛИЦА 5

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:

$$a = c \left(\frac{d_{max}}{d_{min}}\right)^{-d}, \quad (22)$$

где коэффициенты  $c$  и  $d$  приведены в таблице 6.

ТАБЛИЦА 6

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:

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

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 колышущийся 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 9 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 (МРС) и двух отдельных антенн, разнесенных на 72 см. На частоте 42 ГГц осуществлялась испытательная телевизионная передача MPEG-2 с использованием формата DVB-S (КФМн уровня 1/2 с 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.

## 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.

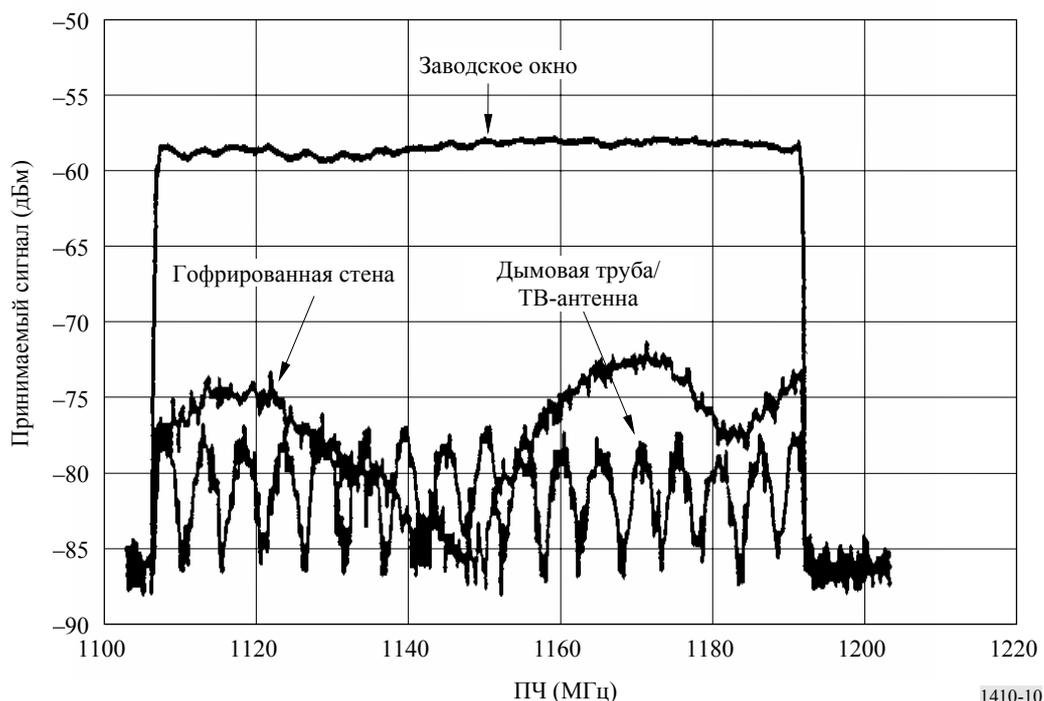
#### 4.2.2 Результаты измерений

Отражение от зданий можно рассматривать одновременно как возможность охвата 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 охвата 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 10 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 10

Частотные характеристики для измеренных отражений от трех разных объектов

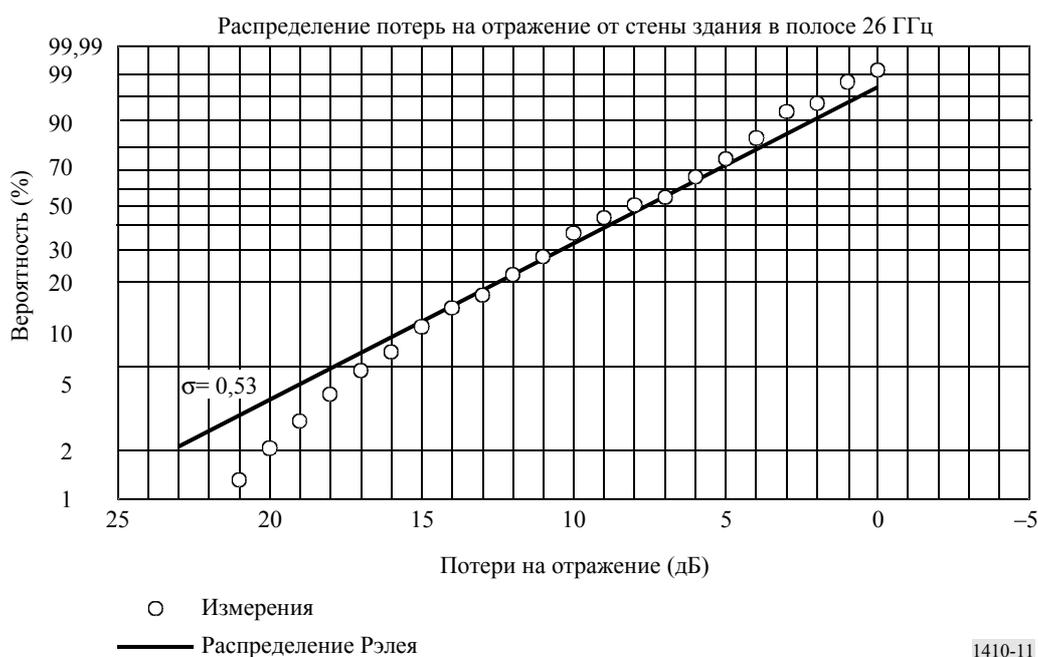


Можно видеть, что заводское окно дает достаточно плоскую частотную характеристику, поскольку оно действует как плоское зеркало и имеет только одну компоненту зеркального отражения. Однако гофрированная стена и дымовая труба дают четкие пульсации, соответствующие разности длины пути (в предположении модели 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 с разверткой по частоте для сигнала с вертикальной поляризацией на частоте 26 ГГц при углах отражения от  $87,5^\circ$  до  $89^\circ$  (то есть 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 11.

РИСУНОК 11

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, то есть 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 выбрать 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 охвата 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.

---