

Рекомендация МСЭ-R P.2109-2 (08/2023)

Серия Р: Распространение радиоволн

Прогнозирование потерь на входе в здание



Предисловие

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

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

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

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

Серии Рекомендаций МСЭ-R

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

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

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

Электронная публикация
Женева, 2024 г.

© ITU 2024

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

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.2109-2

Прогнозирование потерь на входе в здание

(2017-2019-2023)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлен метод оценки потерь на входе в здание на частотах в интервале примерно от 80 МГц до 100 ГГц, который обеспечивает вероятность $0,0 < P < 1,0$. Этот метод не зависит от местных условий и предназначен в первую очередь для применения в исследованиях совместного использования частот и совместимости.

Ключевые слова

Здание, в здании, распространение, помехи, вход

Сокращения/Глоссарий

BEL	Building entry loss	Потери на входе в здание
CW	Continuous wave	Незатухающая волна
LoS	Line of sight	Прямая видимость

Соответствующие Рекомендации, Отчеты МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.2040

Отчет МСЭ-R P.2346

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что для планирования систем и оценки радиопомех может потребоваться определение степени ослабления радиоволн на входе в здание или выходе из него;
- b) что существует необходимость в предоставлении инженерам руководства по оценке покрытия или прогнозированию помех при передаче сигналов от системы, расположенной вне здания, в систему, расположенную в здании, и от системы в здании в систему вне здания,

признавая,

- a) что в Рекомендации МСЭ-R P.2040 содержится руководство по определению влияния строительных материалов и конструкций на распространение радиоволн;
- b) что в Отчете МСЭ-R P.2346 собраны и обобщены результаты измерений уровня потерь на входе в здание,

рекомендует

- 1 использовать для оценки уровня потерь на входе в здание модель, приведенную в Приложении 1;
- 2 использовать Приложение 2, в котором приведены определения для различных типов потерь при распространении, связанных со зданиями, а также представлено руководство по измерению потерь на входе в здание.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Исследования совместного использования частот, проводимые МСЭ-R в рамках различных пунктов повестки дня ВКР-19, основывались на тексте настоящей Рекомендации, которая действовала на момент проведения этой деятельности или на момент времени, когда эта деятельность была завершена.

Приложение 1

1 Введение

В настоящем Приложении представлена модель для оценки потерь на входе в здание (BEL), определенных в Рекомендации МСЭ-R P.2040. Результатом использования этой модели является кумулятивная функция распределения вероятности того, что заданный уровень потерь не будет превышен.

Модель не предназначена для разделения потерь сигнала, проникающего сквозь наружную стену, и затухания на пути через здание. Этот подход был принят, поскольку представляется маловероятным, что в контексте исследований МСЭ-R будет доступна достаточно подробная информация по конкретным зданиям.

Потери на входе в здание демонстрируют широкую изменчивость как в любом данном здании, так и между зданиями. Такие методы как трассировка лучей в сочетании с подробными архитектурными данными могут служить полезными инструментами прогнозирования для конкретного места, однако подобные модели обычно не подходят для общих применений, включая исследования совместного использования спектра.

Статистическая модель, предназначенная для описания характеристик потерь на входе в здание для общего набора зданий, даст настолько широкое статистическое распределение, что оно будет практически бесполезным. С другой стороны, для модели, предназначенной для получения характеристик различных типов зданий, потребовалось бы больше данных, чем имеется в настоящее время, и она не подошла бы для общих исследований совместного использования частот.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Следует должным образом учитывать типы зданий, упоминаемые в настоящей Рекомендации.

Предлагаемая модель основана на данных измерений, собранных в Отчете МСЭ-R P.2346 для диапазона частот от 80 МГц до 73 ГГц. Эта модель может использоваться в рамках метода Монте-Карло, но следует отметить, что модель была проверена только на основе эмпирических данных для диапазона значений вероятности от 0,01 до 0,99.

2 Параметры

В модели используются следующие исходные параметры:

- частота (~0,08–100 ГГц);
- вероятность того, что уровень потерь не будет превышен;
- категория здания (традиционное или теплоэффективное);
- угол места трассы у фасада здания (градусы над горизонтом).

Азимут трассы к терминалу вне здания относительно поверхности здания в явном виде не учитывается. Теория и измерения показывают, что потери сигналов, перпендикулярных к поверхности здания, меньше, чем потери сигналов, входящих под косыми углами, однако статистический результат использования модели представляет собой обобщение всех возможных ориентаций здания относительно терминала вне здания.

В базовой модели предполагается, что расположенная в здании антенна является всенаправленной и что, следовательно, в потерях на входе в здание учитывается вся энергия, поступающая в месторасположения терминала. В некоторых случаях для расположенного в здании терминала может использоваться направленная антенна, которая будет действовать как пространственный фильтр, увеличивая очевидные потери на входе в здание, так как энергия, поступающая по некоторым направлениям, не будет приниматься. Измерения, проведенные в двух крупных зданиях в Республике Корея на частоте 32 ГГц, показали, что потери на входе в здание, измеренные с использованием антенн с шириной луча 5,3 дБ, выше, чем в случае использования всенаправленной антенны. Более подробная информация приведена в Отчете МСЭ-R P.2346.

В соответствии с определением, данным в Рекомендации МСЭ-R P.2040, потери на входе в здание здесь определяются независимо от каких бы то ни было окружающих препятствий. Если здание окружено локальными препятствиями, возможно, потребуется определить дополнительные потери для соответствующих высоты и положения терминала над землей с использованием Рекомендации МСЭ-R P.2108.

В модели неявно предполагается, что терминалы с равной вероятностью могут быть расположены в любой точке в здании.

2.1 Классификация типов зданий

Экспериментальные результаты, приведенные, например, в Отчете МСЭ-R P.2346, показывают, что в аспекте потерь на входе в здание все здания делятся на две отдельные группы: здания, построенные с применением современных теплоэффективных строительных материалов (металлизированное стекло, фольгированные панели), и традиционные здания, построенные без применения таких материалов, при этом потери на входе для первой группы обычно значительно выше, чем для второй. Поэтому модель дает прогнозы для этих двух случаев.

Такое деление зданий на теплоэффективные и традиционные относится исключительно к тепловой эффективности строительных материалов. Не следует делать никаких предположений по поводу года постройки здания, его типа (одно- или многоэтажное), культурно-исторической ценности или метода строительства.

Для оценки потерь на входе в здание важно учитывать тепловую эффективность здания в целом (или общую теплоэффективность). Имея высокотеплоэффективную основную конструкцию с плохо изолированными окнами (например, однослойными с тонким стеклом), здание может стать неэффективным с точки зрения сохранения тепла, и наоборот.

Количественное значение теплоэффективности дает теплопроводность, обычно измеряемую коэффициентом теплопередачи. Низкий коэффициент теплопередачи означает высокую теплоэффективность. Как правило, хорошим показателем теплоэффективности¹ здания служат металлизированные стеклянные окна, изолированные пустотные стены, толстый железобетон и облицовка металлической фольгой.

3 Модель

Потери на входе в здание (BEL) зависят от типа здания, местоположения в здании и движения в здании. Распределение потерь на входе в здание определяется сочетанием двух логарифмически нормальных распределений. Уровень потерь на входе в здание, не превышаемый с вероятностью P , определяется уравнением:

$$L_{BEL}^{omni}(P) = 10 \log(10^{0,1A(P)} + 10^{0,1B(P)} + 10^{0,1C}) \text{ дБ} \quad (1)$$

где:

$$A(P) = F^{-1}(P)\sigma_1 + \mu_1; \quad (2)$$

$$B(P) = F^{-1}(P)\sigma_2 + \mu_2; \quad (3)$$

$$C = -3,0; \quad (4)$$

$$\mu_1 = L_h + L_e; \quad (5)$$

$$\mu_2 = w + x \log(f); \quad (6)$$

$$\sigma_1 = u + v \log(f); \quad (7)$$

$$\sigma_2 = y + z \log(f), \quad (8)$$

¹ Например, типичными значениями коэффициента теплопередачи для теплоэффективной основной конструкции и металлизированного стекла являются соответственно $< 0,3$ и $< 0,9$.

где:

L_h : медианный уровень потерь для горизонтальных трасс, определяемый уравнением:

$$L_h = r + s \log(f) + t (\log(f))^2; \quad (9)$$

L_e : поправка на угол места трассы у фасада здания:

$$L_e = 0,212 |\theta| \quad (10)$$

и

f : частота (ГГц);

θ : угол места трассы у фасада здания (градусы);

P : вероятность того, что потери не превысят данное значение ($0,0 < P < 1,0$);

$F^{-1}(P)$: обратное кумулятивное нормальное распределение как функция вероятности.

Коэффициенты приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Коэффициенты модели

Тип здания	r	s	t	u	v	w	x	y	z
Относительно:	μ_1			σ_1		μ_2		σ_2	
Традиционное	12,64	3,72	0,96	9,6	2,0	9,1	-3,0	4,5	-2,0
Теплоэффективное	28,19	-3,00	8,48	13,5	3,8	27,8	-2,9	9,4	-2,1

Для иллюстрации на рисунке 1 показаны медианные уровни потерь на входе в здание, полученные при использовании модели для двух категорий зданий. В любых исследованиях совместного использования частот всегда следует учитывать полное распределение. На рисунке 2 представлена кумулятивная функция распределения потерь на входе в здание, прогнозируемых при горизонтальном распространении сигнала.

РИСУНОК 1

Прогноз медианного уровня потерь на входе в здание
при горизонтальном распространении сигнала

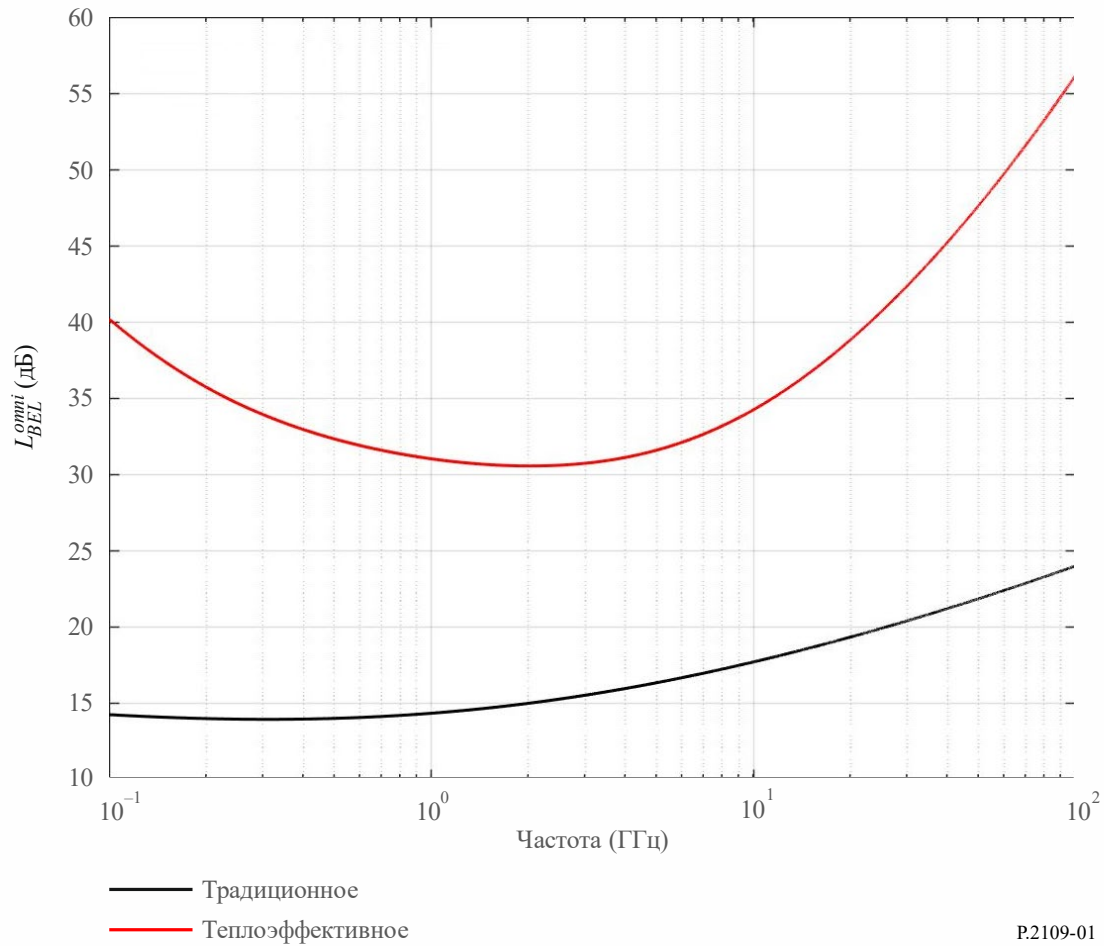
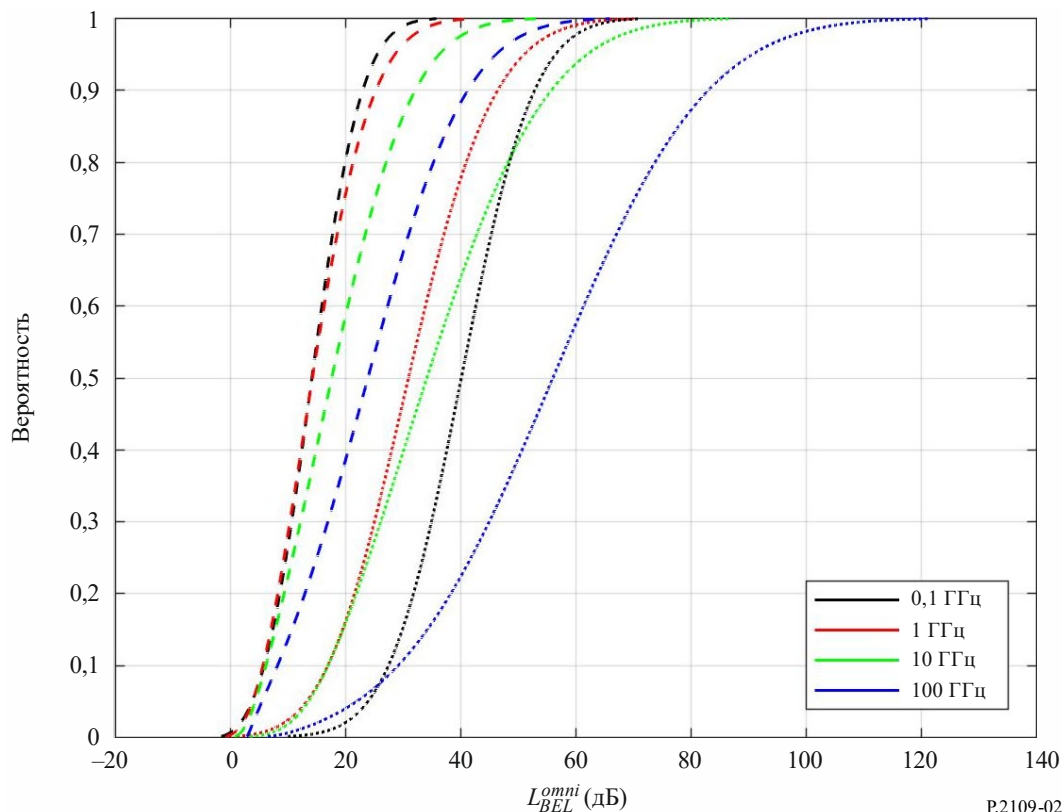


РИСУНОК 2

Прогноз потерь на входе в здание при горизонтальном распространении сигнала
(пунктирная линия: традиционное здание, точечная пунктирная линия: теплоэффективное здание)



P.2109-02

Приложение 2

1 Введение

В настоящем Приложении содержатся определения терминов, относящихся к потерям в зданиях, и приводятся руководящие указания по рекомендуемым методикам измерений.

В Отчете МСЭ-R P.2346 собраны и обобщены результаты измерений потерь на входе в здание.

2 Описание сценариев, содержащих границу раздела снаружи – внутрь здания

2.1 Распространение волн снаружи внутрь зданий – вопросы, касающиеся опорного поля для определения потерь на входе

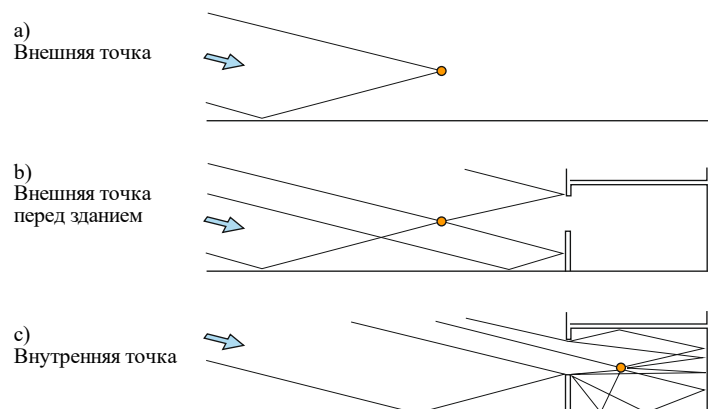
Трудность в определении опорного поля для потерь на входе вызвана тем, что наличие здания приводит к изменению напряженности поля сигнала вне здания. Рисунок 3 иллюстрирует в несколько упрощенной форме связанные с этим проблемы. На трех частях рисунка показано следующее.

- Относительно изолированная внешняя точка принимает прямой и отраженный от земли луч. На самом деле в городской среде оба этих луча вполне могут прийти от удаленного источника в результате дифракции на здании в левой части рисунка. При распространении под малыми углами к горизонту происходит довольно простое (и в основном в вертикальной плоскости) образование лепестков, то есть максимумов и минимумов, при вертикальном перемещении точки.

- b) Если точка не перемещается, то здание располагается сразу за ней. В этом случае она принимает два дополнительных луча, отраженных от здания, один из которых также отражается от земли. В этом случае диаграмма лепестков имеет тонкую структуру как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.
- c) Теперь точка перемещается внутрь здания. Для целей иллюстрации принята достаточно высокая частота, чтобы значимыми были только лучи, входящие в окно. На более низких частотах, когда важное значение приобретает прохождение через стену, диаграмма луча изменяется.

РИСУНОК 3

Упрощенные диаграммы лучей для внешних и внутренних точек



P.2109-03

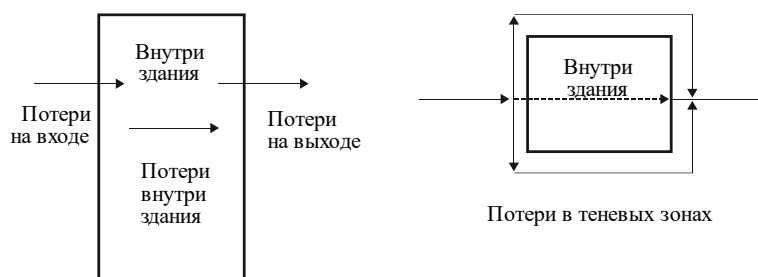
Хотя многолучевое распространение вызывает образование лепестков, суммарная мощность множества лучей приблизительно равна пространственно-усредненному полю. Следовательно, в общем можно ожидать, что наличие здания за приемником повышает напряженность поля принимаемого сигнала. Внутри здания, особенно вблизи облучаемой наружной стены, будет, вероятно, приниматься большее количество лучей, хотя многие из них и будут ослабляться при передаче за счет отражения или дифракции. Таким образом сигнал внутри здания может быть более сильным, чем снаружи.

2.2 Потери на распространение в условиях застройки

На рисунке 4 показаны различные виды потерь в зданиях, имеющие место при сценариях передачи сигналов снаружи здания внутрь и изнутри наружу. Определения даются в следующих разделах.

РИСУНОК 4

Различные виды потерь при распространении в зданиях



P.2109-04

3 Определения

3.1 Определение потерь на входе в здание

Потери на входе в здание – это дополнительные потери, возникающие из-за того, что терминал находится внутри здания.

3.2 Определение потерь за счет затенения зданием

Потери за счет затенения зданием – это разность между медианными значениями изменчивости уровня сигнала в зависимости от местоположения снаружи облучаемого фасада здания и уровнем сигнала снаружи противоположного фасада здания на той же высоте над землей при пространственно-усредненных многолучевых замираниях обоих сигналов. Это явление может рассматриваться как потери передачи при прохождении сигнала через здание.

3.3 Определение прохождения радиосигналов (например, через стену)

Внешние сигналы попадают в закрытое здание главным образом путем прохождения через стены. Прохождение через стены может относиться также и к прохождению через перегородки внутри зданий. Потери при прохождении через стены внутри зданий – это разность между медианными значениями изменчивости уровня сигнала в зависимости от местоположения с одной стороны стены и уровнем сигнала на противоположной стороне на той же высоте над землей при пространственно-усредненных многолучевых замираниях обоих сигналов. Это явление может рассматриваться как потери передачи при прохождении сигнала через стену.

3.4 Определение прохождения радиосигналов через проемы

Прохождение через проемы – это прохождение сигналов с одной стороны стены на другую сторону через отверстия в стенах, например через окна.

3.5 Определение потерь на выходе из здания

По принципу обратимости численное значение потерь на выходе из здания равно значению потерь на входе в здание. В оставшейся части текста эти термины считаются взаимозаменяемыми.

4 Измерение потерь на входе в здание

4.1 Введение

Потери на входе в здание могут быть измерены как разность (в децибелах) между пространственной медианой уровня сигнала снаружи облучаемого фасада здания и пространственной медианой уровня сигнала внутри здания на той же высоте над поверхностью земли (на рисунке 5, ниже, эта высота обозначена как h). Таким образом, Потери = Пространственная медиана внешнего поля – Пространственная медиана внутреннего поля, где результаты измерения выражены в децибелах. Целью проведения измерений снаружи здания является определение приблизительного уровня напряженности поля, который отмечался бы во внутреннем расположении при отсутствии здания. Если расстояние между наружной и внутренней точками измерения составляет значительную часть общей длины трассы, следует учитывать дополнительные потери в свободном пространстве.

Измерение наружного поля следует проводить как можно ближе к зданию, при этом обеспечивая отсутствие эффектов ближнего поля и влияние на характеристики антенн. Как правило, измерения, проводимые с использованием направленных и ненаправленных антенн, дают различные результаты. В любом случае необходимо тщательное описание характеристик антенны. В случаях когда измерение напряженности наружного поля, облучающего здание, невозможно, следует использовать прогнозируемое значение, и это должно быть явно указано.

Как правило, измерения проводятся при наличии прямой видимости (LoS) между наружным терминалом и одной из наружных стен исследуемого здания.

РИСУНОК 5

Расположение эталонной и измерительной антенн при измерении потерь на входе в здание



P.2109-05

Область, выбранная для пространственного усреднения внутри здания, зависит от конкретной задачи и должна быть явно указана; было установлено, что наиболее целесообразным и практичным способом дискретизации является усреднение по помещениям.

4.2 Параметры, подлежащие регистрации

При проведении измерений потерь на входе в здание необходимо регистрировать следующие параметры.

Предполагается, что каждый цикл измерений состоит из ряда замеров, а результаты представлены в виде табличной интегральной функции распределения потерь.

Исследователи должны предоставлять как можно более подробную дополнительную информацию, в частности фотографии интерьера и внешнего вида.

ТАБЛИЦА 2
Параметры измерений

Параметр	Единица измерения	Примечания
Частота	МГц	
Ширина полосы испытательного сигнала	МГц	0 МГц при использовании источника СВ
Окружающая среда	Открытое место/ пригород/город/плотная застройка	Необходимо оценить степень взаимодействия вследствие энергии, рассеиваемой другими зданиями
Есть ли прямая видимость до здания?	Да/нет	Для минимизации погрешностей при измерении необходимо наличие прямой видимости
Усреднение	Спектральное/пространственное/иное	Поле произвольного формата для описания пользователем типа применяемого усреднения (при наличии)
Глубина проникновения	1 – внутренний терминал в помещении/ пространстве с внешней стеной, обращенной к наружному терминалу; 2 – внутренний терминал в помещении/ пространстве без внешних стен; 3 – внутренний терминал в помещении/ пространстве с другой внешней стеной	
Этаж, на котором проведены измерения		Цокольный этаж – 0
Зона, в пределах которой произведены замеры	Квадратные метры	
Количество замеров		Для статистической достоверности результатов необходимо произвести достаточное количество замеров
Эталонное значение	1 – измеренный медианный сигнал; 2 – прогнозируемое затухание в свободном пространстве	Приоритетный вид измерения (по возможности)
Расстояние от наружного терминала до здания	Метры	
Угол места трассы	Градусы	
Минимальное значение азимута относительно нормали к фасаду здания	Градусы	
Максимальное значение азимута относительно нормали к фасаду здания	Градусы	

ТАБЛИЦА 3
Параметры зданий

Параметр	Единица измерения	Примечания
Ширина	Метры	Приблизительная площадь проекции для нестандартного здания
Длина	Метры	
Высота	Метры	
Общее количество этажей		
Толщина внешних стен	Метры	
Толщина внутренних стен	Метры	
Толщина перекрытий	Метры	
Отношение площади окон/проемов к площади фасада здания	%	
Оконные элементы	0 – неизвестно 1 – одинарные 2 – двойные 3 – тройные 9 – иное	
Покрытие окон	0 – неизвестно 1 – отсутствует 2 – металлизированное стекло 3 – внутренняя проволочная сетка 4 – металлические ставни/жалюзи 9 – иное	
Установлена ли металлическая термоизоляция?	0 – неизвестно 1 – нет 2 – да 9 – иное	
Материал перекрытий	0 – неизвестно 1 – дерево 2 – металл 3 – бетон 9 – иное	
Основной материал внешних стен	0 – неизвестно 1 – камень 2 – кирпич 3 – пустотелый кирпич 4 – легкий блок 5 – дерево 6 – бетон 7 – стекло 8 – металл 9 – иное	Материал, из которого в основном состоят внешние стены
Дополнительный материал внешних стен	0 – неизвестно 1 – камень 2 – кирпич 3 – пустотелый кирпич 4 – легкий блок 5 – дерево 6 – бетон 7 – стекло 8 – металл 9 – иное	

ТАБЛИЦА 3 (окончание)

Параметр	Единица измерения	Примечания
Внутренние стены	0 – внутренние стены отсутствуют 1 – камень 2 – кирпич 3 – легкий блок 4 – дерево 5 – бетон 6 – гипсокартон (на деревянном каркасе) 7 – гипсокартон (на металлическом каркасе) 8 – металлизированный гипсокартон 9 – иное	
Материалы крыш	0 – неизвестно 1 – бетонная черепица 2 – шиферная плитка 3 – деревянная черепица 4 – листовой металл 5 – дерево, покрытое рубероидом 9 – иное	