

# ОСЛАБЛЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДИАПАЗОНА 3–5 ГГц ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СТЕНЫ ЗДАНИЙ

А. И. Рыжов<sup>1</sup>, В. А. Лазарев<sup>2</sup>, Т. И. Мохсени<sup>1</sup>, Д. В. Никеров<sup>2</sup>,  
Ю. В. Андреев<sup>1</sup>, А. С. Дмитриев<sup>1</sup>, Н. П. Чубинский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (гос. университет)

Получена 24 апреля 2012 г.

**Аннотация.** В статье описываются измерения степени затухания сверхширокополосных сигналов при прохождении через стены и межэтажные перекрытия современных зданий. Проанализированы имеющиеся в литературе данные по распространению радиоволн диапазона 400 – 10000 МГц в стенах зданий. Проведены измерения параметров затухания сверхширокополосных непрерывных хаотических сигналов в стенах современных зданий. Проводится сравнение экспериментальных данных затухания СШП сигналов с результатами, полученными при использовании узкополосных зондирующих сигналов.

**Ключевые слова:** распространение сигналов, ослабление сигнала, поглощение сигнала, СВЧ-сигнал, узкополосные сигналы, сверхширокополосные сигналы, СШП, сверхширокополосная радиосвязь, динамический хаос, хаотический радиоимпульс.

**Abstract.** Measurements of ultrawideband signal absorption in walls and floors of modern buildings are described. Available data on 400 – 10000 MHz radio wave propagation through wall materials are analyzed. Absorption of ultrawideband continuous chaotic signals in walls is measured. Experimental data on ultrawideband signals is compared with absorption data of narrowband probing signals.

**Keywords:** signal propagation, signal attenuation, signal absorption, microwave signals, narrowband signal, ultrawideband signal, UWB, UWB communications, dynam-

ic chaos, chaotic radio pulse.

## 1. Введение

При решении задачи радиосвязи внутри зданий одним из ключевых факторов является поглощение радиоволн в строительных конструкциях [1]. Этот фактор накладывает ограничение как на дальность радиосвязи, так и на возможный диапазон частот радиосвязи, поскольку практически все среды, включая и строительные материалы, характеризуются монотонно возрастающим с ростом частоты поглощением радиоволн. Поэтому при проектировании системы радиосвязи необходимо принимать в расчет поглощение радиоволн на выбранной частоте в «типовой» стене здания. Поглощение радиоволн происходит и в других элементах строительных конструкций (двери, окна, деревянные перегородки), однако на частотах до 10 ГГц ослабление сигнала в них не превышает 3–5 дБ, т.е. существенно меньше, чем в стенах и межэтажных перекрытиях, и если система спроектирована с учетом прохождения сигнала через стену или межэтажное перекрытие, она будет заведомо работоспособна при прохождении радиосигнала через окна и двери.

В последнее десятилетие активно развиваются системы радиосвязи на основе сверхширокополосных (СШП) сигналов диапазона частот 3–10 ГГц [2–5]. Благодаря использованию СШП сигналов с очень низкой спектральной плотностью (менее  $-40$  дБм/МГц), СШП системы связи не мешают традиционным узкополосным системам радиосвязи, работающим в указанном диапазоне частот. В то же время, благодаря сверхширокой полосе частот (более 500 МГц) СШП системы устойчивы к помехам, создаваемым для них традиционными узкополосными системами радиосвязи. Таким образом, реализуется эффективное использование спектрального ресурса. Системы радиосвязи на СШП сигналах предназначены для работы на относительно небольших расстояниях (до 30 м), в основном, внутри помещений, поэтому вопросы распространения СШП сигналов внутри зданий представляют существенный интерес.

В данной статье исследуются показатели ослабления радиоволн в стенах и межэтажных перекрытиях зданий. Анализируются данные, имеющиеся в литературе, полученные при помощи узкополосных зондирующих сигналов [6–15], а также приводятся полученные авторами результаты измерений ослабления СШП сигналов в стенах зданий. На основе этих данных получается верхняя оценка ослабления СШП сигнала в «типовой» стене современного здания, под которой будем понимать кирпичную или бетонную стену толщиной 30 см.

## 2. Данные по ослаблению узкополосных сигналов в строительных материалах

Основными материалами стен зданий являются кирпич (оштукатуренный), железобетон (с разной арматурой), дерево. Анализ литературы [6–15] показывает, что ослабление сигнала в сухом дереве существенно (в 3–5 раз) меньше, чем в бетоне и кирпиче. Поскольку в данной статье решается задача получения верхней оценки ослабления сигнала в «типовой» стене, в дальнейшем этот материал не рассматривается.

Данные [6–14], касающиеся ослабления сигнала в строительных конструкциях и материалах, сведены в Таблицу 1. Анализ Таблицы 1 показывает очень большой разброс значений затухания. Причина этого заключается, по видимому, в том, что данные были получены в разных условиях.

Таблица 1. Сводные данные по ослаблению радиосигнала в стеновых материалах

Материал	Толщина, мм	Поглощение, дБ				
		900 МГц	2.4 ГГц	3 ГГц	5 ГГц	10 ГГц
Кирпич	89	3.5	6			
Кирпич, оштукатуренный	120		5			
Кирпич	120			15		15
Кирпич, оштукатуренный	150			8		22
Кирпич	178	5				
Кирпич, оштукатуренный	240		9			

Кирпич	267	7				
Бетон	102	12				
Бетон	120		12			
Бетон, облицованный кирпичом	192	14	14			
Бетон	203	23	23			
Железобетон	203	27				
Бетон	305	35	35			
Бетон	400		14			
Бетон	457		18			
Шлакобетон	460			14,5		21
Бетон (внешняя стена)	685		53			
Капитальная стена	700			16		12
Межэтажные перекрытия дерево-бетон	одно/ два/ три		13/19/2 5			
Межэтажные перекрытия железобетон	одно / два		33/44			

Одним из ключевых параметров, определяющих значения электрических параметров сред (в том числе и строительных материалов), является влажность материала. Ослабление радиоволн резко увеличивается при росте показателя влажности, однако данные о влажности измеряемых материалов крайне редко приводятся в литературе.

На рис. 1 приведены выборочные данные из работы [15] по погонному (в пересчете на 1 м толщины материала) затуханию радиоволн в основных видах строительных материалов (бетон, кирпич) в зависимости от влажности в диапазоне частот 1–10 ГГц.



Из рис. 1 видно, что погонное затухание во всех этих средах резко растет с увеличением влажности. Используя графики на рис. 1, можно понять, при каких условиях были полученные данные из Таблицы 1.

### 3. Экспериментальное исследование параметров ослабления узкополосных радиосигналов в стенах зданий

Анализируя данные поглощения радиоволн из источников [6–14], можно заметить, что они относятся, в основном, к отдельным, активно используемым участкам спектра, таким, как нелицензируемые ISM-диапазоны или диапазоны систем сотовой связи. Данных для диапазона 3–10 ГГц, отведенного для радиосвязи на СШП сигналах, в литературе крайне мало.

Поэтому в данной работе методом радиопросвечивания были выполнены измерения затухания радиоволн в стенах и перекрытиях зданий в широком диапазоне частот 0,5–8 ГГц. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Две антенны А1 (приемная) и А2 (излучающая) располагались на расстояниях  $X_1$  и  $X_2$  по разные стороны от стены (или межэтажного перекрытия) толщиной  $t$ , а комплексный коэффициент передачи зондирующего сигнала  $S_{21w}(f)$  определялся с помощью измерителя комплексных коэффициентов передачи ROUNDE & SCHWARZ Vector Network Analyzer ZVCE.

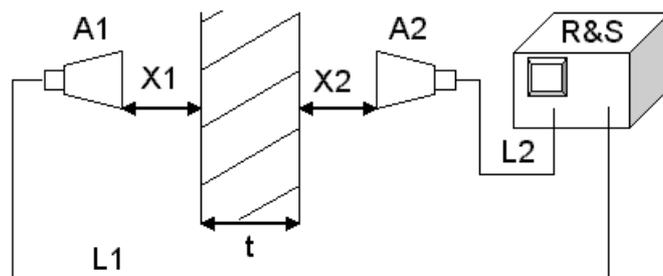


Рис. 2. Блок-схема измерения частотных зависимостей модуля и фазы коэффициента передачи через стены и перекрытия зданий

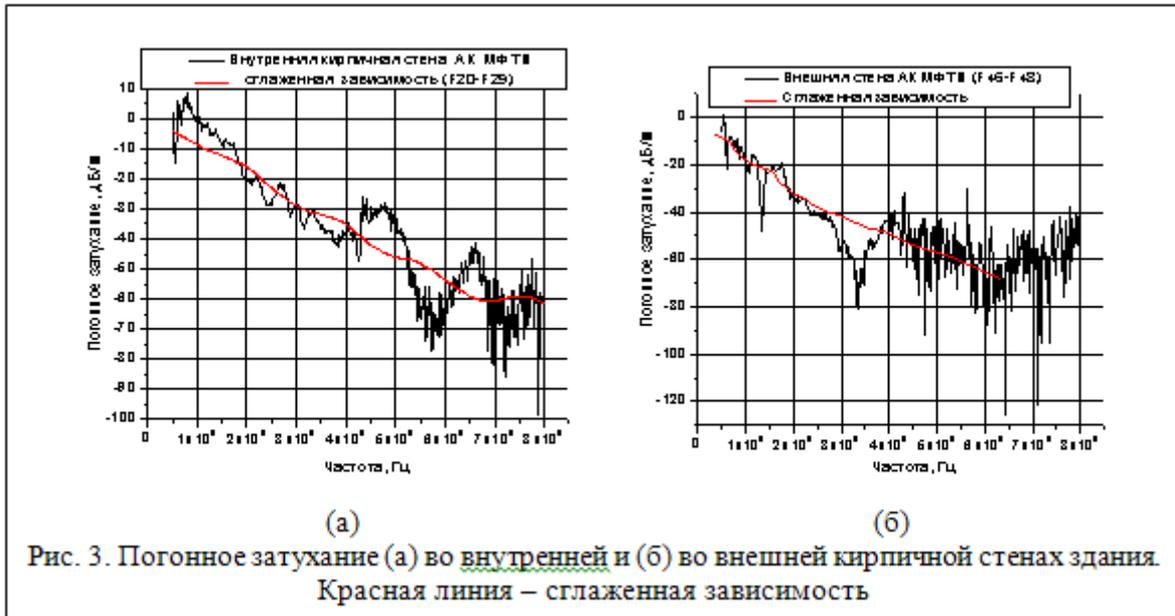
Затем антенны располагались на том же расстоянии  $X_{\Sigma} = X_1 + X_2 + t$  в широком проеме двери или в свободной от посторонних предметов части помещения и определялся коэффициент передачи  $S_{21FS}(f)$  в «свободном пространстве» в том же диапазоне частот. Разность этих коэффициентов, нормированная на толщину стены, определяет в первом приближении частотную зависимость погонного затухания в материале стены:

$$Q_0 \approx (S_{21W} - S_{21FS}) / t, \text{ дБ/м.} \quad (1)$$

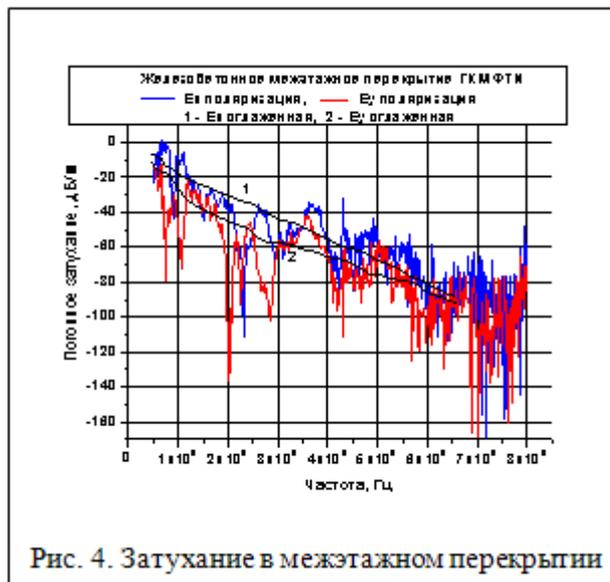
Приближенность формулы (1) связана с необходимостью учета отражения радиоволны от стены и рефракционного увеличения амплитуды регистрируемой прошедшей волны. Первое приводит к завышению поглощения в материале стены, а второе – к его занижению. Оба эти поправки могут быть точно учтены, если известна диэлектрическая комплексная проницаемость материала  $\epsilon$ , которая, в свою очередь, определяется из графиков поведения фазы радиоволны при прохождении через материал стены. Измерения проводились в Аудиторном и Главном корпусах МФТИ. В эксперименте средние измеренные значения проницаемости стен и перекрытий составляли  $\epsilon \approx 3,5 \dots 4,0$ .

На рис. 3а приведена частотная зависимость погонного затухания во внутренней практически сухой кирпичной стене (влажность кирпичной кладки 2...3%) Аудиторного корпуса. Мелкомасштабные колебания функции затухания на частотах выше 3,5...4,0 ГГц обусловлены рассеянием радиоволн на неоднород-

родностях кирпичной кладки, а также переотражениями сигнала внутри помещения с приёмной антенной.



Последний частотный отрезок, где сглаженная функция вместо монотонного спада выходит на приблизительно постоянный уровень, указывает на другую природу мелкомасштабных осцилляций. Они в большей степени обусловлены многократными переотражениями сигнала, прошедшего через стену внутрь комнаты, от наиболее удаленных отражающих поверхностей (потолок, стены, крупная мебель и т.п.).



Погонное затухание во внешней стене этого же здания (см. рис. 3б) не-

сколько выше, что связано с большей влажностью (3...5%) этой стены сравнению с внутренней стеной. Как видно из этих рисунков, на частоте 2,4 ГГц погонное затухание составляет 24 и 37 дБ/м (в пересчете на стену толщиной 30 см затухание составляет 7 и 11 дБ); на частоте 4 ГГц затухание в стене толщиной 30 см составляет соответственно 10 и 15 дБ/м.

Измерения погонного затухания железобетонного межэтажного перекрытия проведены в Главном корпусе МФТИ (рис. 4). Измерения выполнены для двух поляризаций:  $E_x$  – поперек силовой продольной арматуры и  $E_y$  – вдоль нее. Разница погонных затуханий до середины диапазона весьма ощутима и на отдельных частотах превышает 10 дБ. При ориентации вектора электрического поля вдоль основной силовой арматуры ( $E_y$ ) большее эффективное погонное затухание обусловлено экранированием поля. На более высоких частотах, когда половина длины волны  $\lambda/2$  становится меньше расстояния между стержнями силовой арматуры, разница погонных затуханий для разных поляризаций постепенно уменьшается. Следует также отметить заметно большую величину затухания по сравнению с кирпичной кладкой.

#### 4. Измерение параметров поглощения сверхширокополосного сигнала

Данные из источников [6–15] и из эксперимента в разделе 3 получены для узкополосных сигналов. Представляет интерес исследование характеристик прохождения *сверхширокополосных* сигналов через стеновые материалы и сравнение их с данными для узкополосных измерений.

Такие измерения проводились при помощи так называемых прямохаотических СШП приемопередатчиков. Сигнал этих приемопередатчиков представляет из себя СШП хаотические радиоимпульсы длительностью 100 нс диапазона 3–5 ГГц. Приемник этих приемопередатчиков построен на логарифмическом детекторе, т.е. напряжение на выходе детектора  $V_{out}$  пропорционально логарифму мощности входного сигнала  $P_{in}$ , т.е.

$$V_{out} = S \log(P_{in}). \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности  $S$  называют крутизной детектора. В данном эксперименте использован логарифмический детектор AD8317, имеющий крутизну  $S = 22$  мВ/дБ [16]. Антенны передатчика и приемника ненаправленные.

Схема эксперимента практически совпадает со схемой на рис. 2. Измерения проводились в конференц-зале Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Стена между конференц-залом и коридором имеет толщину  $t = 64$  см. В нескольких местах стены имеются выборки, в которых толщина стены составляет  $t = 34$  см.

Передатчик располагался в конференц-зале, приемник по другую сторону стены в коридоре шириной около 3 м. Измерялось напряжение  $V_{\text{out}_W}$  на выходе логарифмического детектора приемника. Затем приемник и передатчик располагались на таком же расстоянии в конференц-зале (выполняющем роль «свободного пространства»), и снова замерялось напряжение  $V_{\text{out}_{FS}}$  на выходе логарифмического детектора. Ослабление сигнала в стене оценивалось по формуле

$$Q = \frac{(V_{\text{out}_{FS}} - V_{\text{out}_W})}{St}, \text{ дБ/м.} \quad (3)$$

Амплитуда хаотических радиоимпульсов оценивалась при помощи цифрового осциллографа Tektronix DPO-4054. Точность описанной схемы измерений составляет около 1 дБ.

Измерялось ослабление сигнала в кирпичных стенах толщиной  $t = 34$  и  $64$  см. Для каждой стены измерения проводились в трех различных положениях (см. рис. 5):

- 1) Передатчик и приемник прижаты к стене.
- 2) Передатчик прижат к стене, приемник находится за стеной на расстоянии 1 м от передатчика.
- 3) Передатчик прижат к стене, приемник находится за стеной на расстоянии 2 м от передатчика.

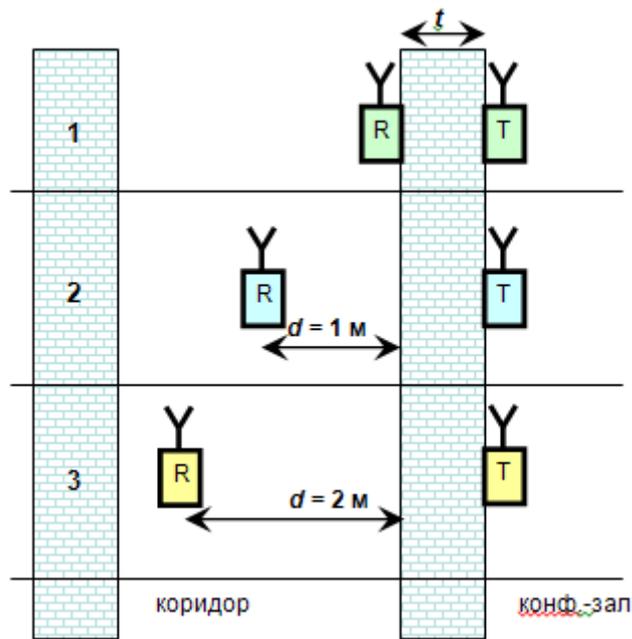


Рис. 5. Схема расположения передатчиков (Т) и приемников (R) в эксперименте по измерению ослабления СШП сигналов

При анализе результатов эксперимента необходимо принимать во внимание отражение СШП сигнала на стены при нормальном падении радиоволны и «фокусировку» волнового потока вследствие рефракции. При падении радиоволны на поверхность раздела двух сред с различными показателями преломления часть волны отражается обратно. Коэффициенты отражения  $S_{11}$  и прохождения  $S_{21}$  (по мощности) определяются формулами

$$S_{11} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2, \quad S_{21} = \frac{4n_2 n_1}{(n_2 + n_1)^2}, \quad (4)$$

где  $n_1, n_2$  – показатели преломления сред [17]. В диапазоне частот 3–5 ГГц действительная часть диэлектрической проницаемости кирпича и бетона меняется слабо и составляет  $\epsilon \approx 3,5 - 4,0$ , поэтому при расчетах можно брать  $n_1 = 1$  (воздух),  $n_2 = 1,9 - 2$  (стена), тогда от стены отражается примерно 10% сигнала. Неучет этого эффекта приводит к завышению значения ослабления  $Q$  примерно на 0,5 дБ.

Второй фактор – «фокусировка» радиоволны вследствие рефракции, приводит к занижению величины поглощения, как поясняется на рис. 6. Сфериче-

ская радиоволна, распространяющаяся из точки  $O_1$ , при переходе из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем  $n_2$  и снова в среду с показателем  $n_1$  «прижимается» к оси  $O_1O_2$ .

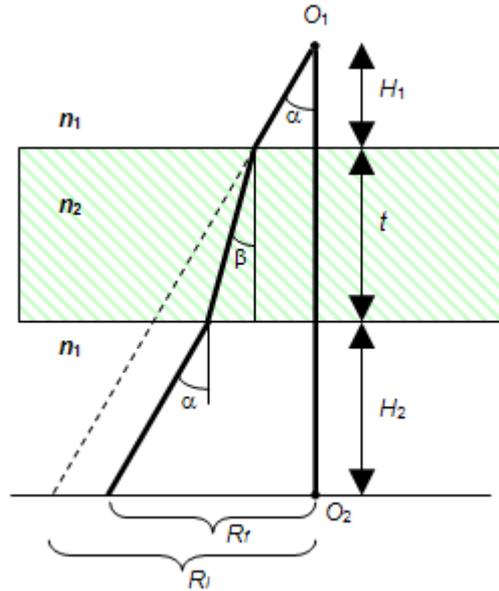


Рис. 6. Сужение («фокусировка») радиоволны при прохождении через стену

Пусть приемник располагается в точке  $O_2$ . Если бы стены не было, то радиус конуса с углом раскрыва  $\alpha$  с вершиной в точке  $O_1$  на расстоянии  $(H_1+t+H_2)$  составлял бы  $R_i$ . При наличии стены с  $n_2 \neq n_1$  радиус конуса составит  $R_f$ . Таким образом, в первом приближении, энергия передатчика в этом конусе в первом случае распределяется на площади  $S_i = \pi R_i^2$ , а во втором случае – на площади  $S_f = \pi R_f^2$ . Тогда относительное усиление сигнала в приемнике (при отсутствии поглощения в стене) составит

$$M = \left( \frac{R_i}{R_f} \right)^2 = \frac{(H_1 + t + H_2) \operatorname{tg} \alpha}{H_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha + t \cdot \operatorname{tg} \beta + H_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{H_1 + H_2 + t}{H_1 + H_2 + t \cdot \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg} \alpha}, \quad (5)$$

где  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$ . Вдоль оси  $O_1O_2$  ( $\alpha \approx 0$ ) усиление составляет

$$M \approx \frac{H_1 + H_2 + t}{H_1 + H_2 + t/n_2}. \quad (6)$$

Усиление вследствие рефракции максимально, если приёмник и передатчик

прижаты к стене ( $H_1 = H_2 = 0$ ),  $M \approx n_2 = 2$  (3 дБ). С увеличением расстояния приёмника и передатчика до стены этот эффект быстро уменьшается.

С учетом рассмотренных факторов, результаты измерений поглощения  $Q$  в положениях 1–3 составили:

- 1)  $Q \approx 2,5 \pm 1$  дБ;
- 2) Стена 34 см  $Q \approx 5,5 \pm 1$  дБ.  
Стена 64 см  $Q \approx 9,5 \pm 1$  дБ
- 3) Стена 34 см  $Q \approx 3 \pm 1$  дБ  
Стена 64 см  $Q \approx 6 \pm 1$  дБ.

Таким образом, в ходе экспериментов было установлено, что если приёмник и передатчик установлены на расстоянии нескольких сантиметров от стены (по разные стороны) стена вносит меньше всего ослабления – около 2,5 дБ с учетом рефракции.

Разброс измеренных данных может объясняться как относительно невысокой точностью измерений ( $\pm 1$  дБ), так и локальными характеристиками материала стен. Кроме того, меньшие показатели поглощения в случае 3 по сравнению со случаем 2 можно объяснить влиянием волны, отраженной от второй стены коридора.

Кроме прямых измерений, оценки ослабления сигнала в стене можно сделать путем анализа дальности действия пары приемопередатчиков в режиме «точка – точка». Если максимальная дальность действия пары приемопередатчиков в условиях прямой видимости (без препятствия) составляет  $l_1 \approx 13$  м, при работе через кирпичную стену толщиной  $t = 64$  см дальность действия системы связи уменьшается до  $l_2 \approx 4$  м (антенны приемопередатчиков ненаправленные; радиоволна падает на стену нормально). Расчет по формуле  $l_1^n = S l_2^n$ , где  $n$  – показатель затухания сигнала в пространстве,  $n = 2$ , показывает, что стена вносит дополнительное ослабление порядка  $S = 10$  дБ. При прохождении через кирпичную стену толщиной  $t = 34$  см дальность действия системы связи падает приблизительно в два раза, что означает, что такая стена вносит дополнительное

ослабление порядка  $S = 6$  дБ.

Усредняя данные измерений и оценок, делаем следующий вывод: ослабление СШП сигнала диапазона 3–5 ГГц в кирпичной стене составляет:

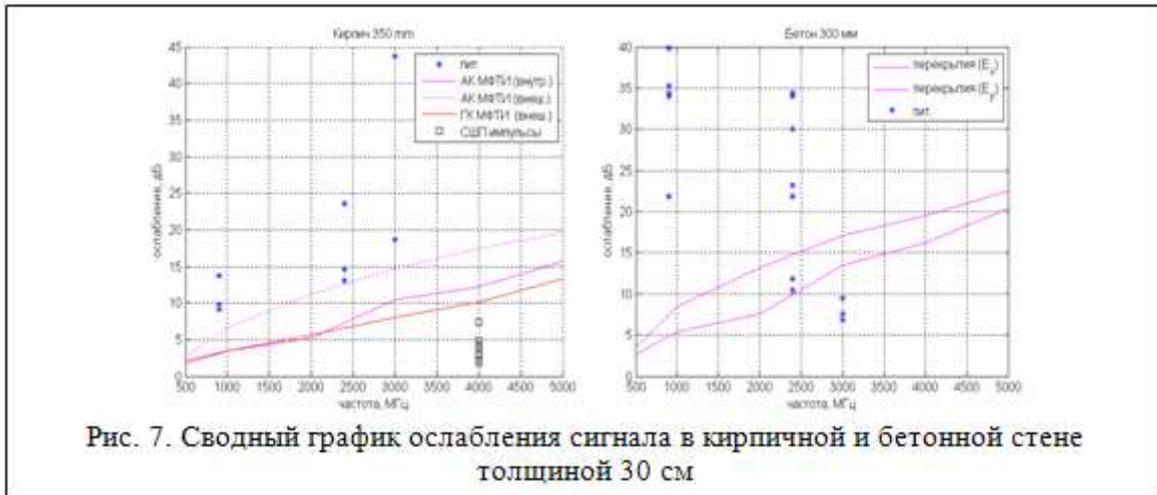
~ 5–7 дБ в стене 34 см;

~ 6–10 дБ в стене 64 см.

## 5. Заключение

Чтобы иметь возможность сравнивать разнородные данные из различных источников и экспериментов о величине затухания радиосигнала в строительных материалах, необходимо привести их к некоторой «типовой» стене. В качестве типовой стены современного здания можно выбрать стену толщиной  $t = 30$  см. При итоговой оценке величины затухания сигнала в стенах современных зданий данные будут пересчитаны к этой толщине.

Оценки ослабления радиосигнала в «типовой» стене толщиной 30 см на основе данных для ослабления в кирпиче и бетоне из литературы и измерений приведены на рис. 7. Анализируя эти оценки, можно сделать следующие выводы.



С увеличением частоты ослабление радиосигнала в стенах зданий в нижней части гигагерцового диапазона увеличивается довольно медленно. Ослабление радиосигнала в диапазоне 3–5 ГГц (средняя частота 4 ГГц) больше, чем ослаб-

ление сигнала в активно используемом диапазоне 2,4 ГГц, на 5 дБ.

По данным экспериментов ослабление СШП сигнала в полосе 3–5 ГГц оказалось ниже, чем ослабление узкополосного сигнала на тех же частотах.

При оценке потерь в типовой стене для узкополосного сигнала в диапазоне до 3 ГГц и для СШП сигнала в полосе 3–5 ГГц можно с запасом ориентироваться на величину 10 дБ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 - 2013 годы» «Работы по проведению проблемно-ориентированных поисковых исследований и созданию научно-технического задела в области информационно-коммуникационных технологий, выполняемые в рамках Таможенного Союза». Гос. контракт № 11.519.11.4027.

### Литература

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. 4-е изд., М.: Связь, 1972.
2. Siwiak K., McKeown D. Ultra-Wideband Radio Technology. Wiley, 2004.
3. Win M.Z., Scholtz R.A. "Impulse radio: how it works," IEEE Commun. Lett. 1998. vol. 2. no. 2. p. 36–38.
4. Federal Communications Commission (FCC), "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems", First Report and Order, ET Docket 98-153, FCC 02-48; Adopted: February 14, 2002; Released: April 22, 2002.
5. О результатах работ по конверсии радиочастотного спектра по вопросу использования полосы радиочастот 2,85-10,6 ГГц сверхширокополосными беспроводными устройствами. Решение ГКРЧ № 09-05-02 от 15 декабря 2009 г.
6. Dobkin D.M. RF Engineering for Wireless Networks Hardware, Antennas, and Propagation. Elsevier, 2005.
7. Geier J. Beating Signal Loss in WLANs. 2002. [www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/1431101/Beating-Signal-Loss-in-WLANs.htm](http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/1431101/Beating-Signal-Loss-in-WLANs.htm).

8. 2.4 GHz Signal Attenuation Chart. [www.technolab-inc.com/html/Tech/signl\\_atten.htm](http://www.technolab-inc.com/html/Tech/signl_atten.htm).
9. [wireless.wikia.com/wiki/Wi-Fi](http://wireless.wikia.com/wiki/Wi-Fi).
10. Hein G., Teuber A. et al. GNSS Indoors. Fighting the fading. 2008. [www.insidegnss.com](http://www.insidegnss.com).
11. Как защититься от электромагнитного поля. [www.colan.ru](http://www.colan.ru)
12. Кошелев Н.Ф., Карелин О.Н., 1974; Шандала М.Г. и др. Характеристика защитных свойств строительных материалов и изделий из них при действии микроволн (1996). [grachev.distudy.ru/Uch\\_kurs/sredstva/Templ\\_1/templ\\_1\\_6.htm](http://grachev.distudy.ru/Uch_kurs/sredstva/Templ_1/templ_1_6.htm).
13. Чухнов К. Особенности проектирования радиоканальных объектов систем сигнализации. Технологии защиты, 2010, № 1, с. 44–46.
14. Safaai-Jazi A., Riad S.M., et al. Report on Through-the-Wall Propagation and Material Characterization. Time Domain and RF Measurement Lab., Bradley Dept. of Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061-0111. Nov. 18, 2002.
15. Лещанский Ю. И., Ульянычев Н.В. и др. Электрические параметры кирпича, цемента и древесины в диапазоне метровых-сантиметровых радиоволн. Ред. журн. «Изв. ВУЗов – Радиофизика». Горький, 1982. 7 с. Ил.-Библиогр.: 2 назв. Рус.-Деп. ВИНТИ. № 4772-82.
16. AD8317 Техническое описание. [www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8317.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8317.pdf).
17. Сивухин Д. В. Общий курс физики. т. IV. Оптика. 3-е изд., М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2005. 792 с.