

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ / SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND PROCESSING OF INFORMATION

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАТУХАНИЙ СИГНАЛА ВНУТРИ ЗДАНИЙ

Научная статья

Перфильев А.А.^{1,*}, Лупин С.А.², Гуреев А.В.³² ORCID : 0000-0001-8817-1362;^{1, 2, 3} Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Зеленоград, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (taliors[at]yandex.ru)

Аннотация

Представлены результаты исследования возможности применения волноводной модели распространения электромагнитных волн внутри зданий. Проведён теоретический расчёт затуханий сигналов внутри реального здания на частоте 400 МГц. Полученные результаты были проверены при помощи прямых измерений с использованием специального оборудования. Совпадение экспериментальных результатов с теоретическим расчетом можно рассматривать как практическое обоснование применимости волноводной модели для анализа затуханий сигналов в беспроводных сетях передачи информации и оценки эффективности пассивных средств защиты, уменьшающих амплитуду сигналов, распространение которых нежелательно за пределами ограждающих конструкций зданий и помещений.

Ключевые слова: распространение радиоволн внутри зданий, волноводная модель, затухание сигнала.

USE OF A WAVEGUIDE SIMULATOR OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION TO ASSESS SIGNAL ATTENUATION INSIDE BUILDINGS

Research article

Perfilev A.A.^{1,*}, Lupin S.A.², Gureev A.V.³² ORCID : 0000-0001-8817-1362;^{1, 2, 3} National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Russian Federation

* Corresponding author (taliors[at]yandex.ru)

Abstract

The results of research into the possibility of using the waveguide simulator of electromagnetic wave propagation inside buildings are presented. A theoretical calculation of signal attenuation inside a real building at a frequency of 400 MHz is carried out. The obtained results were verified by direct measurements using special equipment. The coincidence of the experimental results with the theoretical calculation can be regarded as a practical substantiation of the applicability of the waveguide model to analyse the attenuation of signals in wireless information transmission networks and to evaluate the effectiveness of passive protection devices that reduce the amplitude of signals whose propagation is undesirable outside the building envelope and premises.

Keywords: radio wave propagation inside buildings, waveguide simulator, signal attenuation.

Введение

В современном мире проблема распространения электромагнитных волн в условиях городской среды крайне актуальна. Рекомендации МСЭ-Р описывают ослабление радиосигналов в свободном пространстве, атмосфере, дожде и растительности [1], [2], [3], [4]. Существуют модели распространения электромагнитных волн в плотной городской застройке [5], [6], [7] или на большие расстояния, в которых городским рельефом можно пренебречь [8]. Эти модели описывают беспроводные каналы связи. Однако не все они могут быть применены для расчёта естественного затухания электромагнитных сигналов внутри помещений и анализа защищённости объектов от утечек информации. Для этой оценки требуется учитывать геометрию пространства внутри зданий, поскольку охраняемый периметр проходит либо по границам одного из помещений, либо целого здания.

Особенностями распространения электромагнитных волн в таких условиях являются:

- наличие большого количества физических препятствий на пути распространения сигнала;
- наличие переотражения сигнала на пути распространения электромагнитных волн.

Для решения этой проблемы может быть использована волноводная модель беспроводных каналов внутри зданий. Такая модель подойдет и для проведения оценки пассивных средств защиты информации и естественного затухания сигналов, в том числе тех, которые формируют каналы утечки. К подобным сигналам можно отнести побочное электромагнитное излучение, присутствующее в автоматизированных информационных системах, при помощи которого возможен перехват и восстановление сигнала злоумышленниками [9].

При таком подходе для расчета характеристик распространения электромагнитных волн необходимо решать задачу о возбуждении электромагнитных колебаний в объемных резонаторах с потерями прямоугольной формы, которую имеют подавляющее количество помещений и зданий.

В данной статье будет проведена оценка возможности применения волноводной модели для оценки не уровня распространённого сигнала, а его затухания. Для верификации модели произведен расчёт значений по методике, описанной в соответствующей статье [10].

Основные результаты

Проводимые исследования включают следующие этапы:

- расчёт уровня излучения при помощи волноводной модели;
- прямые измерения уровня излучения в разных точках помещения;
- сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными.

Практические эксперименты проводились в одном из корпусов НИУ МИЭТ. На рисунке 1 представлен план лаборатории, в которой проводились измерения.

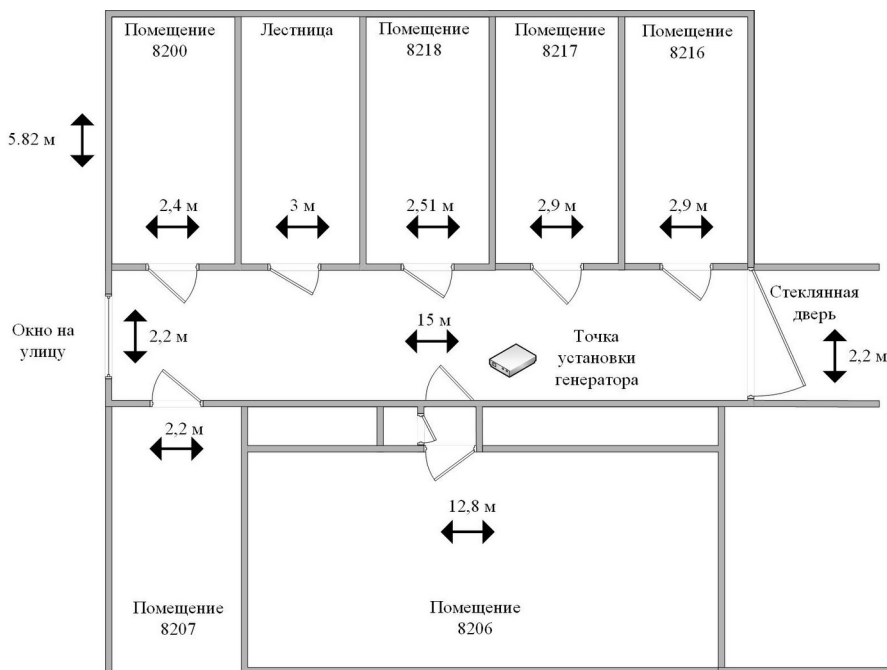


Рисунок 1 - План исследуемых помещений
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31.1>

Основные характеристики здания:

- высота потолка во всех помещениях составляет 2,975 метра;
- толщина всех стен равняется 15 см, за исключением помещения №8218, толщина стен в котором равняется ~29 см;
- толщина межэтажного перекрытия составляет 45 см.
- размер дверных проемов составляет 210х90 см для всех дверей;
- толщина дверей равна ~7 см.

Измерения проводились при помощи лазерного дальномера.

При использовании волноводной модели необходимо рассчитать коэффициенты затухания в физических средах и знать значение сигнала в опорной точке [11]. Для их определения использовалось следующее оборудование:

- генератор сигналов SMB 100A;
- анализатор спектра FSV13;
- антенна измерительная дипольная НБА-02;
- антенна АШП-12;
- антенна АШН-2.

Место установки генератора при измерении значения уровня сигнала в опорной точке показано на рисунке 1. Измерительная антенна была установлена на расстоянии 1 метр от излучающей антенны (рис. 2). Для имитации излучения источника электромагнитных сигналов использовался генератор сигналов SMB 100A вместе с антенной АШП-12. Данная антенна имеет тороидальную (близкую к круговой) диаграмму направленности в горизонтальной плоскости при вертикальной установке, что позволяет имитировать распространение побочного электромагнитного излучения. Генератор сигналов имеет максимальную выходное напряжение в 131.9 дБ относительно мкВ. Измерения проводились на частоте 400 МГц. Для получения максимального уровня сигнала использовался поворотный стол, с его помощью излучающая антенна делала полный оборот вокруг оси стола, что позволяет уменьшать возможную неравномерность диаграммы направленности. Измеренный уровень напряжения составил 103 дБмкВ. Измерительная антенна НБА-02, согласно паспорту, на частоте 400 МГц имеет коэффициент калибровки в 23.1 дБмкВ. Следовательно, напряженность в опорной точке равняется 126.1 дБмкВ.



Рисунок 2 - Стенд для измерения значения уровня сигнала в опорной точке
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31.2>

Таблица 1 - Настройки анализатора спектра при проведении измерений
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31.3>

Параметр	Значение параметра (модель)	Значение параметра (опорная точка)
Trace	Average (100)	Max Hold
Detector	RMS	RMS
RBW/VBW	10 kHz	10 kHz
Frequency	400 MHz	400 MHz
Span	1 MHz	1 MHz
Attenuator	0 dB	0 dB

Значения параметров анализатора спектра, указанные во втором столбце таблицы 1, использовались для измерений затуханий в физических средах и значений уровня сигнала в исследуемых помещениях. Значения из третьего столбца использовались для измерения значения уровня сигнала генератора в опорной точке.



Рисунок 3 - Измерение затуханий в дверях (излучатель)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31.4>

Расчёт затуханий проводился на основе экспериментальных данных: генератор сигналов с излучающей направленной антенной АШН-2 ставился напротив анализатора спектра с измерительной антенной НБА-02 на расстоянии 1 метр, после чего проводился замер уровня напряжения. Второе измерение проводилось следующим образом: генератор сигналов и излучающая антенна АШН-2 ставились с одной стороны исследуемой физической преграды на расстоянии 1 метр, а анализатор спектра и измерительная антенна с другой стороны на том же самом расстоянии (рис. 3). Разница в измерениях является затуханием. Для упрощения расчётов затухание в гипсокартонных стенах одинаково для всех подобных межкомнатных перекрытий.

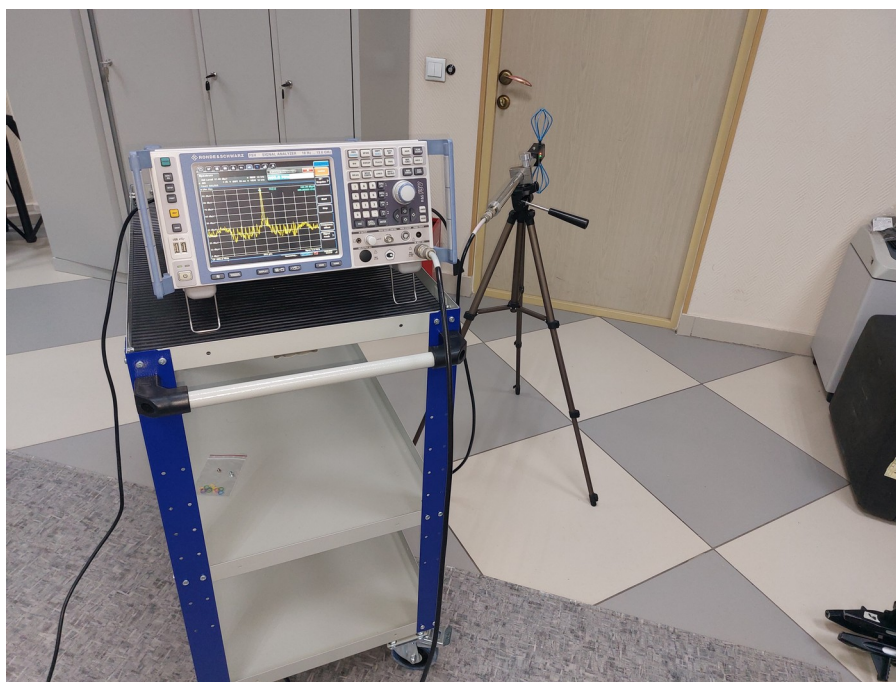


Рисунок 4 - Измерение затуханий в дверях (приёмник)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31.5>

Таблица 2 - Измеренные значения затуханий

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31.6>

Физическая среда	Затухание в дБмкВ
Затухание в стене	7,56
Затухание в двери	6,12
Затухание в двойной стене (№8206)	9,67
Затухание в двойной двери (№8206)	11,74
Затухание в окне	4,47
Затухание в железной двери (Лестница)	9,43
Затухание в кирпичной стене (№8218)	14,45
Затухание в межэтажном перекрытии	19,81

Для упрощения расчёта рассмотрена модель здания, учитывающая только один этаж и коридор этажом выше и ниже. Для каждого помещения рассматривается входящий поток также из тех помещений, с которыми есть минимум одна общая стена. Отражения с улицы не учитываются.

Вычисления проводились согласно упрощённой методике расчёта волноводной модели, описанной в статье [12]. Основные положения этой модели используют для расчета следующие соотношения:

$$\frac{\bar{P}_k}{P_r} = \frac{\bar{S}_k}{\bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3 + \bar{S}_4 + \bar{S}_5 + \bar{S}_6} \quad (1)$$

$$\bar{S}_k = \frac{S_k \cdot \Delta_k}{V} \quad (2)$$

$$\Delta_k \cong 8,7 \text{ дБ} * \frac{d_{cm}}{L_{cm}} \quad (3)$$

Где P_r – мощность излучающего генератора, S_k – площадь k -й грани прямоугольника ($k = 1-6$), V – объем резонансной структуры, d_{cm} – толщина стены, L_{cm} – затухание в рассматриваемой d_{cm} стене.

Если k -ая грань (стена, пол или потолок) была неоднородна, проводилась нормализация значения $\tilde{\gamma}$. К примеру, если на одной поверхности помещения присутствует окно, то для площади окна берется одно значение $\tilde{\gamma}$, а для стены другое, с соответствующим весовым коэффициентом. Геометрическое расположение окна не учитывается. Таким образом, данная модель учитывает неоднородность физических материалов, что повышает достоверность данной модели. При расчёте значения потока на входе в помещение необходимо учитывать также, что смежные помещения также представляют резонирующий волновод и должны учитываться при расчёте входного потока мощности. Следовательно, базовые вычисления должны быть проведены и для смежных помещений.

Таблица 3 - Результаты экспериментов

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31.7>

Помещение	Расчёт		Измерение	
	Сигнал, дБмкВ	Затухание, дБмкВ	Сигнал, дБмкВ	Затухание, дБмкВ
8200	99,78	26,32	103,1	23
Лестница	98,15	27,95	101,84	24,26
8218	100,26	25,84	104,39	21,71
8217	96,35	29,75	98,82	27,28
8216	96,37	29,73	100,05	26,05
Стеклопанельная дверь	90,10	36,00	120,66	5,44
8206	113,57	12,53	109,61	16,49
8207	93,95	32,15	98,52	27,58
Окно	99,71	26,39	99,65	26,45
3 этаж	112,93	13,17	107,75	18,35
1 этаж	112,93	13,17	108,68	17,42

Параметры измерения на анализаторе спектра представлены в третьем столбце таблицы 1. Выбор способа отрисовки кривых «Max Hold» был выбран для того, что измеренный уровень сигнала был максимально возможным для исследуемого помещения. Вследствие того, что пространство в помещениях однородно, измерения в смежных

помещениях проводились в трех случайных точках при помощи анализатора спектра и направленной измерительной антенны. Уровень сигнала в помещении высчитывался, как среднее арифметическое от измеренных значений.

Для сравнения расчётных значений с экспериментальными данными, необходимо учитывать погрешность измерений. Для анализатора спектра FSV13 при частоте 400 МГц погрешность составляет ± 0.5 дБ, измерительная антенна НБА-02 имеет погрешность в ± 2.5 дБмкВ.

Все измерения, кроме измерения опорного уровня сигнала, проводились при усреднении значений на анализаторе спектра. Измерение опорного уровня сигнала происходило в режиме фиксации максимального значения амплитуды. Это необходимо для рассмотрения максимально допустимого уровня сигнала, как наиболее опасного. Поскольку в данном случае учитывалось единственное измерение хоть и с максимальным уровнем сигнала, для данного случая необходимо также учитывать максимально возможную погрешность.

В статье, описывающей волноводную модель распространения сигналов, указано допустимое значение разницы между экспериментальными измерениями и волноводной моделью в 3 дБ. Поскольку дБмкВ + 120 = дБ, увеличение уровня сигнала на 1 дБмкВ равно увеличению на 1 дБ.

Таким образом, волноводная модель может быть признана достоверной при разнице в затухании между экспериментом и результатом моделирования меньше, чем 5,5 дБмкВ.

Таблица 4 - Оценка полученных результатов

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.31.8>

Помещение	Затухание, дБмкВ (измерение)	Затухание, дБмкВ (расчёт)	Разница, дБмкВ	Допустимая разница, дБмкВ	Итог
8200	23	26,32	3,32	5,5	+
Лестница	24,26	27,95	3,69	5,5	+
8218	21,71	25,84	4,13	5,5	+
8217	27,28	29,75	2,47	5,5	+
8216	26,05	29,73	3,68	5,5	+
Стеклянная дверь	5,44	36,00	30,56	5,5	-
8206	16,49	12,53	-3,96	5,5	+
8207	27,58	32,15	4,57	5,5	+
Окно	26,45	26,39	-0,06	5,5	+
3 этаж	18,35	13,17	-5,18	5,5	+
1 этаж	17,42	13,17	-4,25	5,5	+

Заключение

Затухания, полученные при помощи волноводной модели, согласуются с данными, полученными экспериментально. Исключениями являются расчеты, выполненные для сигнала, проходящего через стеклянную дверь. Для стеклянной двери значения, полученные моделью, значительно ниже, чем экспериментальные. Это связано с тем, что стеклянная дверь имеет затухание ниже, чем теоретическая погрешность измерений, следовательно, в этом случае нужно рассматривать коридор и его продолжение за стеклянной дверью как один волновод. В остальных случаях экспериментально измеренные значения согласуются с теми, которые получились при расчёте с помощью волноводной модели.

Ограничением использования подобной модели является увеличение количества необходимых измерений за счет того, что для корректного моделирования необходимо уточнять затухание в физических преградах. Для получения более точных оценок необходимо учитывать и наличие мебели внутри помещения, поскольку она также может вносить существенный вклад в затухание и влияет на конфигурацию волноводов внутри помещений.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Рекомендация МСЭ-R P.525-4. Расчет ослабления в свободном пространстве // Ассамблея радиосвязи МСЭ-R. — 2019 — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 08.08.2023)
2. Рекомендация МСЭ-R P.676-13. Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие // Ассамблея радиосвязи МСЭ-R. — 2022 — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-13-202208-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 08.08.2023)
3. Рекомендация МСЭ-R P.838-3 Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования // Ассамблея радиосвязи МСЭ-R. — 2005 — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-R.pdf (дата обращения: 08.08.2023)
4. Рекомендация МСЭ-R P.840-5. Ослабление из-за облачности и тумана // Ассамблея радиосвязи МСЭ-R. — 2012 — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-5-201202-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 08.08.2023)
5. Serfaty Y. Waveguide Phenomena in Wideband Indoor Radio Channel / Y. Serfaty, D. Porrat // 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. — 2010. — 5662216. DOI: 10.1109/EEEI.2010.5662216.
6. Blaunstein N. Average Field Attenuation in the Nonregular Impedance Street Waveguide / N. Blaunstein // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1998. — 6164793. — p. 1782 - 1789. DOI: 10.1109/8.743813.
7. Гуреев А.В. Волноводная модель каналов связи в плотной городской застройке / А.В. Гуреев // Известия вузов. Электроника. — 2003. — 3. — с. 50-53.
8. Андреев Ю.В. Двухлучевая модель распространения сверхширокополосного радиосигнала / Ю.В. Андреев, М.М. Петросян // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. — 2022. — 1. — с. 136-143. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-136-143.
9. Хорев А.А. Техническая защита информации: учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. Т. 1. Технические каналы утечки информации / А.А. Хорев — Москва: НПЦ «Аналитика», 2008. — 436 с.
10. Гуреев А.А. Волноводная модель беспроводных каналов связи внутри зданий / А.А. Гуреев, В.А. Кустов // Исследовано в России. — 2002. — 135. — с. 1519-1536.
11. Марков В.П. Автоматизированный комплекс для определения величины затухания сигнала / В.П. Марков, А.В. Данеев // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. — 2020. — 2(7). — с. 46-55.
12. Гуреев А.В. Энергетические характеристики распространения электромагнитных волн внутри зданий / А.В. Гуреев // Известия вузов. Электроника. — 2015. — 4.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Rekomendatsija MSE-R P.525-4. Raschet oslablenija v svobodnom prostranstve [Recommendation ITU-R P.525-4. Calculation of Free-space Attenuation] // ITU Radiocommunication Sector. — 2019 — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-I!!PDF-R.pdf (accessed: 08.08.2023) [in Russian]
2. Rekomendatsija MSE-R P.676-13. Zatuhanie v atmosferynyh gazah i svjazannoe s nim vozdejstvie [Recommendation ITU-R P.676-13. Attenuation by Atmospheric Gases and Related Effects] // ITU Radiocommunication Sector. — 2022 — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-13-202208-I!!PDF-R.pdf (accessed: 08.08.2023) [in Russian]
3. Rekomendatsija MSE-R P.838-3 Model' pogonnogo oslablenija v dozhde, ispol'zuemaja v metodah prognozirovaniya [Recommendation ITU-R P.838-3 Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods] // ITU Radiocommunication Sector. — 2005 — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-I!!PDF-R.pdf (accessed: 08.08.2023) [in Russian]
4. Rekomendatsija MSE-R P.840-5. Oslablenie iz-za oblachnosti i tumana [Recommendation ITU-R P.840-5. Attenuation due to Clouds and Fog] // ITU Radiocommunication Sector. — 2012 — URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-5-201202-S!!PDF-R.pdf (accessed: 08.08.2023) [in Russian]
5. Serfaty Y. Waveguide Phenomena in Wideband Indoor Radio Channel / Y. Serfaty, D. Porrat // 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. — 2010. — 5662216. DOI: 10.1109/EEEI.2010.5662216.
6. Blaunstein N. Average Field Attenuation in the Nonregular Impedance Street Waveguide / N. Blaunstein // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. — 1998. — 6164793. — p. 1782 - 1789. DOI: 10.1109/8.743813.
7. Gureev A.V. Volnovodnaja model' kanalov svjazi v plotnoj gorodskoj zastrojke [Waveguide Model of Communication Channels in Dense Urban Areas] / A.V. Gureev // Proceedings of Universities. Electronics. — 2003. — 3. — p. 50-53. [in Russian]
8. Andreev Ju.V. Dvuhluhevaja model' rasprostraneniya sverhshirokopolosnogo radiosignala [Two-path Model of Ultrawideband Propagation] / Ju.V. Andreev, M.M. Petrosjan // All-Russian Open Armandov Readings: Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction. — 2022. — 1. — p. 136-143. DOI: 10.24412/2304-0297-2022-1-136-143. [in Russian]
9. Horev A.A. Tehnicheskaja zaschita informatsii: ucheb. posobie dlja studentov vuzov. V 3 t. T. 1. Tehnicheskie kanaly utechki informatsii [Technical Protection of Information: textbook for university students. In 3 vol. Vol. 1. Technical Channels of Information Leakage] / A.A. Horev — Moskva: NPTs «Analitika», 2008. — 436 p. [in Russian]
10. Gureev A.A. Volnovodnaja model' besprovodnyh kanalov svjazi vnutri zdaniy [Waveguide Model of Wireless Communication Channels inside Buildings] / A.A. Gureev, V.A. Kustov // Investigated in Russia. — 2002. — 135. — p. 1519-1536. [in Russian]

11. Markov V.P. Avtomatizirovannyj kompleks dlja opredelenija velichiny zatuhaniya signala [Automated Complex for Determining the Value of Signal Attenuation] / V.P. Markov, A.V. Daneev // Information Technologies and Math Modeling in Management of Complex Systems. — 2020. — 2(7). — p. 46-55. [in Russian]
12. Gureev A.V. Energeticheskie harakteristiki rasprostraneniya elektromagnitnyh voln vnutri zdaniy [Energy Characteristics of the Propagation of Electromagnetic Waves inside Buildings] / A.V. Gureev // Proceedings of Universities. Electronics. — 2015. — 4. [in Russian]