

УДК 621.371.3

## **УЧЕТ НЕРОВНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ПОМЕЩЕНИЯХ**

**А. И. Панычев, А. В. Максимов, А. А. Ваганова**

**Южный федеральный университет, Институт радиотехнических систем и управления,  
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44**

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2017 г.

**Аннотация.** Для оценки распределения уровня сигнала беспроводной сети в помещении применяются имитационные модели территориально-частотного планирования, базирующиеся на лучевой трассировке сигналов. Основное ограничение этих моделей – приближение гладкости стен и перекрытий здания. В данной работе предложен способ учета неровностей отражающих поверхностей помещения. Статистическая оценка влияния неровностей отражающих поверхностей получена посредством случайного изменения координат, определяющих положение плоскостей в пространстве. Показано, что при неровностях величиной до двух длин волны математическое ожидание уровня сигнала отличается от детерминированного расчета не более чем на 5 %.

**Ключевые слова:** многолучевое распространение, лучевая трассировка, геометрическая оптика, алгоритм, нерегулярность, WLAN, IEEE 802.11.

**Abstract.** To estimate the distribution of the signal strength of a wireless network indoor, simulation models of spatial frequency planning based on ray tracing of signals are used. The main limitation of these models is the approximation of the smoothness of the walls and ceilings of the building.

In this paper, the problem of accounting for irregularities of reflecting surfaces in the multipath analysis of WLAN signal indoors is solved. Presence of door and window apertures, beams of overlapping, niches, columns, pilasters, furniture items is taken into account with the help of statistical estimation of influence of constructive irregularities of reflecting surfaces. This method is the best option for the proportion

between the preparatory stage, the required computing resources and the result accuracy.

The analysis is based on the method of deterministic calculation of the volumetric distribution of the intensity of a WLAN signal in a room with obstacles. The deviations of the reflecting surface from the flat profile are simulated by randomly changing the coordinates that determine the position of the plane. The normal and uniform law of distribution of a random coordinate value is considered.

A set of simulation tests was performed, which resulted in the getting of the aggregate values of the WLAN transmission factor for each room volume point. Statistical processing of these data sets has been performed. The statistical characteristics of the set of calculated arrays are calculated: arithmetic mean, variance, standard deviation, skewness.

It is established that the maximum deviation of the arithmetic mean from the deterministic value of about 5% is observed in the region of predominance of reflected rays, for which the position of the reflecting surface is the determining one.

The minimum deviation of the arithmetic mean from the deterministic value is less than 1% in the shadow area of the obstacle for the direct beam, where the effect of the reflected rays is insignificant. The results of modeling using the normal and uniform laws of the distribution of coordinate values differ by not more than 0.5%. The distributions of the WLAN transmission coefficient module are significantly different from the normal distribution.

**Key words:** multipath propagation, ray tracing, geometrical optics, algorithm, irregularity, WLAN, IEEE 802.11.

## **1. Введение**

Как отмечают эксперты Juniper Research [1], всё возрастающая часть трафика передается не через сети операторов мобильной связи стандарта GSM (3G/4G), а через беспроводные локальные сети стандарта IEEE 802.11. Аналитики прогнозируют, что в ближайшие годы основной объем информации смартфонов и планшетных компьютеров будет передаваться средствами

WLAN, в то время как сотовые операторы будут обеспечивать не более 40 % мобильного трафика.

Учитывая масштабность использования и перспективы развития WLAN, актуальными являются вопросы совершенствования процедур инспектирования и профилирования беспроводных сетей. В этой связи тщательного анализа требуют процедуры построения карты покрытия, анализа интерференции, оценки уровня сигнала, распределения каналов WLAN. Очевидно, практически невозможно учесть все факторы, влияющие на качество и производительность работы WLAN, так как нельзя выполнить точное предсказание распространения радиоволн внутри помещений. Для оценочного расчета, визуализации и анализа сигналов в зоне покрытия WLAN используются специальные компьютерные симуляторы.

Программа Wireless InSite позволяет моделировать распространение радиоволн внутри и вне зданий [2, 3]. Возможности конструктора проекта позволяют учесть характеристики зданий и местности, задать параметры антенн, указать расположение передающих и приемных антенн, задать выходную мощность передатчика. В вычислителе Wireless InSite заложены физические модели для расчета распространения сигнала в конкретных условиях местности вне населенных пунктов, городской высотной и малоэтажной застройки, в зданиях и помещениях. Учитывается распространение радиоволн через двери и окна, отражение от стен и передача через стены, а также многолучевое действие на другие строения.

Программа TamoGraph Site Survey является эффективным инструментом для организации эксплуатации WLAN [4]. Программа позволяет сократить расходы и время на планирование и обслуживание сети, увеличить производительность, расширить покрытие. Особенности программы являются: простой сбор данных; спектральный анализ; общий анализ беспроводных сетей с визуализацией уровня сигнала, зоны покрытия, помех, скорости передачи информации; автоматическое нахождение расположения точек доступа.

Также разрабатываются имитационные модели WLAN, ориентированные на совершенствование анализа отдельных аспектов многолучевого распространения в сложных условиях плотного расположения препятствий, оценки уровня сигнала WLAN в условиях многократного отражения, преломления и дифракции на конструкциях здания [5–9]. Отдельные аспекты алгоритма трехмерной лучевой трассировки и полученные на его основе объемные распределения комплексного коэффициента передачи каналов WLAN внутри зданий обсуждаются в [10–16].

В основе указанных программных и математических инструментов исследования многолучевого распространения радиоволн лежит метод геометрической оптики, предусматривающий выполнение требования гладкости отражающих поверхностей. Как правило, наличие дверных и оконных проемов, балок перекрытия, ниш, колонн, пилястров, предметов мебели, препятствий вблизи отражающих поверхностей и других геометрических нерегулярностей внутри помещения не учитываются.

## **2. Постановка задачи и ее анализ**

Поставим задачу учета неровностей отражающих поверхностей при анализе многолучевого распространения сигналов WLAN внутри помещения.

Геометрические неоднородности на отражающих поверхностях помещения могут быть учтены несколькими способами.

Во-первых, можно использовать поверхности со сложным профилем, аппроксимированным плоскими гладкими площадками [2]. Недостаток такого варианта состоит в большой размерности массивов координат и трудоемкости их заполнения.

Во-вторых, каждый строительный элемент конструкции здания можно рассматривать как элемент, определяющий границы отдельного кластера в комбинированной модели помещения [10, 15]. Основным недостатком такого подхода является многократно возрастающая сложность модели при

сохранении условия гладкости отражающих поверхностей внутри каждого кластера.

В-третьих, можно использовать статистическую оценку влияния конструктивных неровностей отражающих поверхностей. Представляется, что такой способ является оптимальным вариантом по совокупности трудоемкости подготовительного этапа, требуемых вычислительных ресурсов и точности результата.

### 3. Решение задачи

Предлагается следующая методика статистической оценки влияния неровностей внутренних поверхностей.

В основу положена методика детерминированного расчета объемного распределение интенсивности сигнала WLAN в помещении с препятствиями, отдельные положения которой изложены в [11–13, 16]. Отклонения отражающей поверхности от плоского профиля моделируются посредством случайного изменения координат, определяющих положение плоскости. Закон распределения значений случайных координат может быть произвольным.

Нормальный закон распределения случайного значения координаты применяется в помещениях с нерегулярным расположением дверных проемов, окон, ниш, пилястр и других конструктивных элементов. Обоснованным является выбор статистических параметров отражающих поверхностей по следующим соображениям: математическое ожидание равно значению координаты в детерминированном случае, стандартное отклонение определяется преобладающим размером конструктивных элементов и задается по правилу «три сигма».

Равномерный закон распределения случайного значения координаты используется в помещениях с регулярным расположением ниш и выступов. Диапазон изменения случайной координаты определяется характерным размером конструктивных параметров.

С использованием принятых подходов к формированию массива исходных

данных выполняется серия имитационных тестов, по результатам которых формируется совокупность значений коэффициента передачи WLAN в заданной точке помещения. Затем производится статистическая обработка этой совокупности данных. Вычисляются статистические характеристики совокупности рассчитанных массивов: математическое ожидание, дисперсия, стандартное отклонение, коэффициент асимметрии.

Статистические характеристики используются для проверки гипотез относительно закона распределения уровня сигнала WLAN.

#### 4. Обсуждение результатов

Рассмотрим описанный способ моделирования неровностей отражающих поверхностей на примере помещения с одним препятствием и одной точкой доступа WLAN стандарта IEEE 802.11. Помещение имеет габариты 50 м x 20 м x 10 м. Препятствие имеет поперечник 6 м x 2 м. Стены помещения изготовлены из кирпича (относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 4.4 - 0.18j$ ), пол, потолок препятствие изготовлены из бетона (относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 6.1 - 1.2j$ ). Точка доступа имеет антенну в виде горизонтального полуволнового вибратора, перпендикулярного длинной стене. Приемная антенна является вертикальным полуволновым вибратором. Учитывается однократное отражение от стен и препятствия, а также дифракция на ребрах препятствия

Распределение модуля коэффициента передачи WLAN в горизонтальной плоскости, содержащей точку доступа, в детерминированном случае показано на рис. 1.

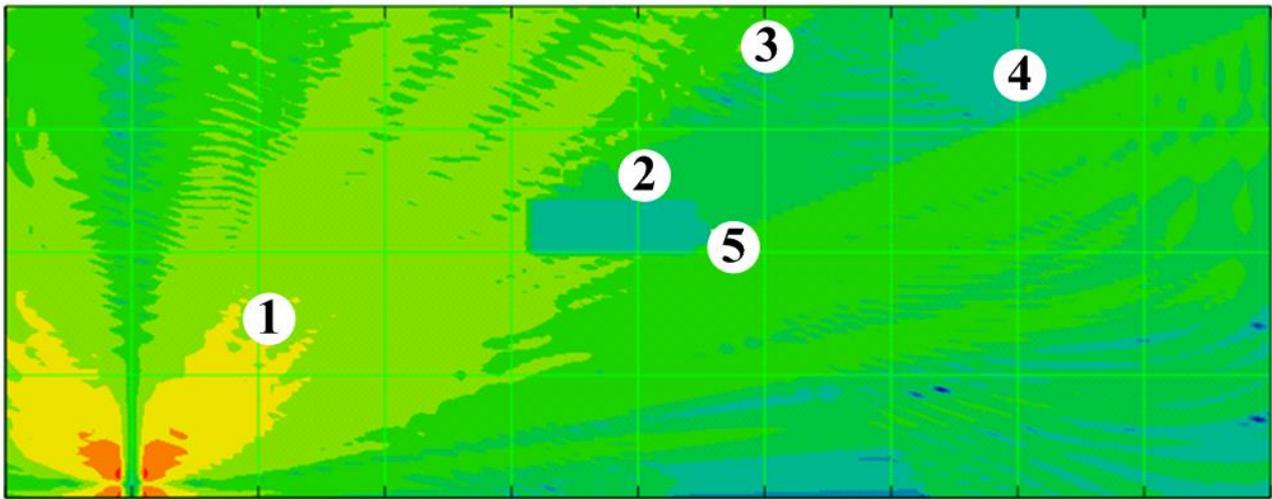


Рис. 1. Иллюстрация распределения модуля коэффициента передачи WLAN в помещении с препятствием (детерминированный случай)

Отмечены характерные точки наблюдения: 1 – точка в области преобладания прямых лучей; 2 – точка в области тени от препятствия для прямого луча; 3 – точка в области преобладания отраженных лучей; 4 – точка в области наиболее глубокой тени, образованной наложением тени от препятствия для прямого луча и тени для отраженного от стены луча от затененного препятствием пятна; 5 – точка в области преобладания дифракционных лучей вблизи ребра препятствия.

Рис. 2 иллюстрирует несколько реализаций распределения модуля коэффициента передачи WLAN при случайном изменении координат стен с нормальным законом распределения, математическое ожидание равно координате в детерминированном случае, стандартное отклонение равно 0,1 м.

С целью получения статистической оценки модуля коэффициента передачи WLAN в характерных точках наблюдения рассчитаны массивы значений коэффициента при 100 случайных значениях координат. Статистические характеристики интенсивности сигнала в случае нормального закона распределения координат сведены в табл. 1. Результаты при равномерном законе распределения приведены в табл. 2.

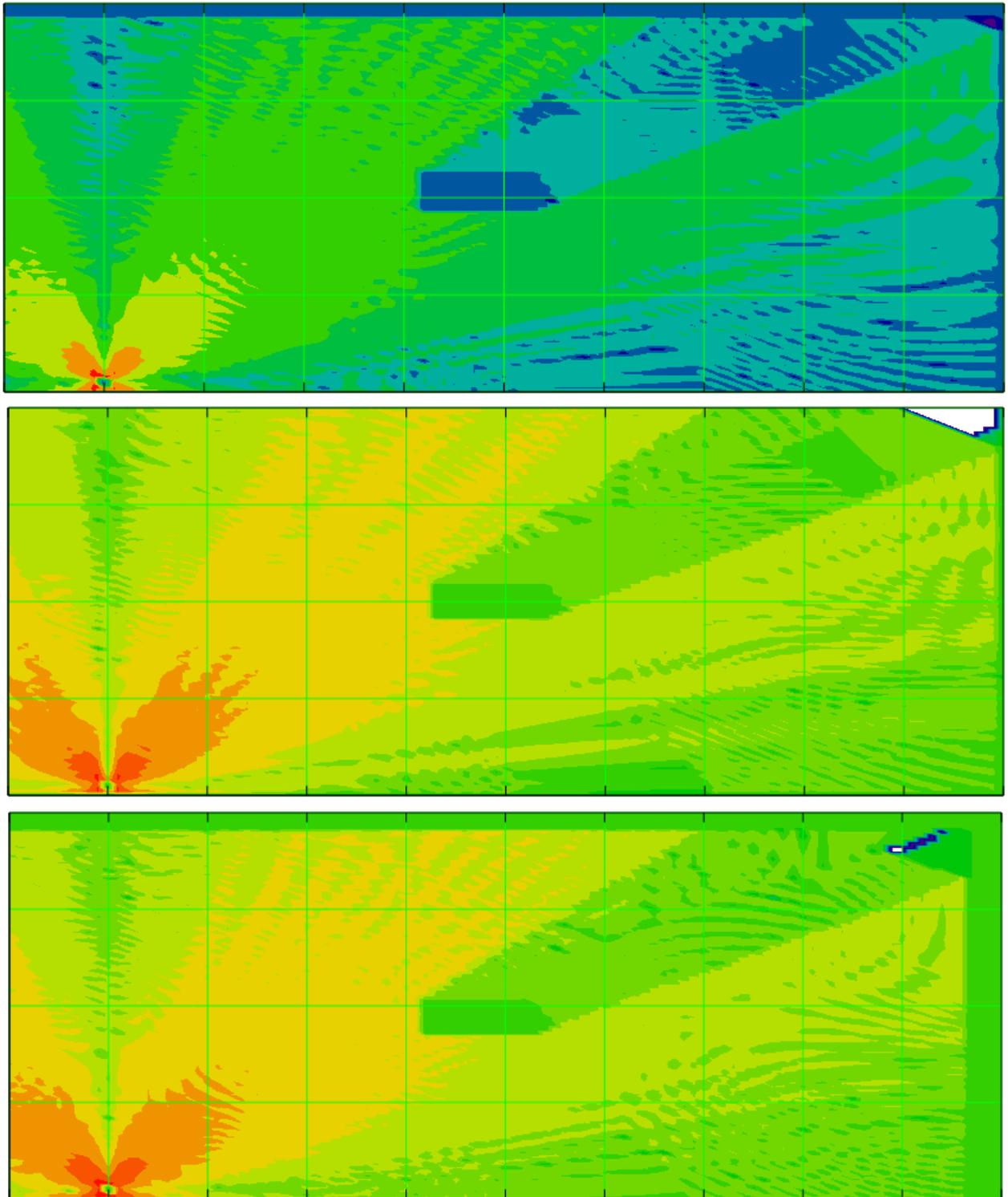


Рис. 2. Иллюстрация некоторых реализаций распределения модуля коэффициента передачи WLAN в помещении с препятствием

Таблица 1 – Статистические характеристики модуля коэффициента передачи WLAN (нормальный закон распределения неровностей отражающих поверхностей)

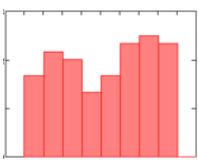
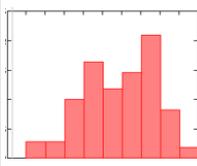
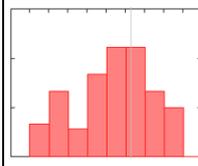
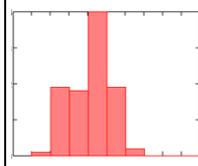
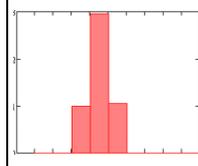
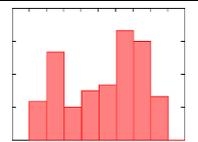
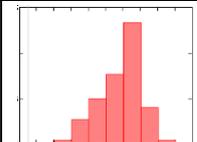
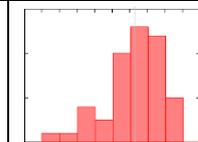
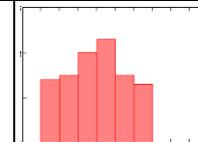
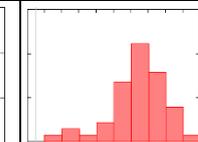
Коэффициент передачи, дБ	Точка наблюдения				
	1	2	3	4	5
Детерминированный расчет	-55,479	-91,552	-67,072	-97,994	-71,961
Математическое ожидание	-54,673	-91,545	-70,186	-97,987	-71,784
Дисперсия	2,321	0,012	4,799	0,01	3,228
СКО	1,494	0,108	2,191	0,1	1,797
Коэффициент асимметрии	-0,214	-0,406	-0,589	-0,404	-0,336
Гистограмма					

Таблица 2 – Статистические характеристики модуля коэффициента передачи WLAN (равномерный закон распределения неровностей отражающих поверхностей)

Коэффициент передачи, дБ	Точка наблюдения				
	1	2	3	4	5
Детерминированный расчет	-55,479	-91,552	-67,072	-97,994	-71,961
Математическое ожидание	-54,678	-91,55	-70,416	-98,013	-71,519
Дисперсия	2,08	0,023	5,548	0,026	3,451
СКО	1,442	0,153	2,355	0,161	1,858
Коэффициент асимметрии	-0,36	0,028	-1,187	-0,029	1,07
Гистограмма					

Анализ данных из табл. 1 и 2 позволяет сделать следующие выводы о статистической оценке модуля коэффициента передачи WLAN.

Максимальное отклонение математического ожидания от детерминированного значения (до 3 дБ, или около 5 %) есть в точке наблюдения 3. Это является следствием преобладания в этой точке отраженных лучей, для которых положение отражающей поверхности определяет величину коэффициента отражения.

Минимальное отклонение математического ожидания от детерминированного значения (около 0,01 дБ, или менее 1 %) есть в точке наблюдения 2, где влияние отраженных лучей незначительно.

Результаты моделирования с использованием нормального и равномерного законов распределения значений координат отличаются незначительно (не более 0,5 %).

Величина коэффициента асимметрии показывает, что распределения модуля коэффициента передачи WLAN во всех исследованных случаях существенно отличаются от нормального распределения. Лучшее приближение к нормальному закону распределения соответствует точкам наблюдения 2 и 4, расположенным в области тени.

## 5. Заключение

Таким образом, предложенная статистическая оценка учета неровностей отражающих поверхностей помещения при анализе многолучевого распространения сигналов WLAN в помещении отличается незначительной трудоемкостью подготовительного этапа, низкими требованиями к вычислительным ресурсам и приемлемой информативностью относительно интенсивности сигнала в различных точках помещения.

## Литература

1. Nitin Bhas. Data Offload & Onload. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.juniperresearch.com/researchstore/enabling-technologies/>

- [mobile-data-onload-offload/wi-fi-small-cell-network-strategies](#) (дата обращения: 27.09.2017).
2. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет и моделирование распространения радиоволн в городской среде и пересеченной местности с помощью программы Wireless InSite. // EDA Express. 2004. № 9. С. 35-39.
  3. Wireless InSite® Propagation Software. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.remcom.com/wireless-insite> (дата обращения: 27.09.2017).
  4. TamoGraph® Site Survey. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tamos.ru/products/wifi-site-survey> (дата обращения: 27.09.2017).
  5. Madej P. 3D Wireless Networks Simulator – Visualization of Radio Frequency Propagation for WLANs. Dissertation. Univ. of Dublin. Trinity College. 2006.
  6. Dimitriou A.G., Bletsas A., Bessis N., Polycarpou A.C., Sahalos G.N. Theoretical Findings and Measurements on Planning a UHF RFID System Inside a Room. Radioengineering. June 2011. Vol. 20. No. 2. pp. 387-397.
  7. Lay Z., De La Roche G., Bessis N., Kuonen P., Clapworthe G., Zhou D., Zhang G. Statistical Intelligent Ray Launching Algorithm for Indoor Scenarios. Radioengineering. June 2011. Vol. 20. No. 2. pp. 398-408.
  8. Maltsev A., Maslennikov R., Lomayev A., Sevastyanov A., Khoryaev A. Statistical Channel Model for 60 GHz WLAN Systems in Conference Room Environment. Radioengineering. June 2011. Vol. 20. No. 2. pp. 409-422.
  9. Chung H.K. and Bertony H.L. Rang-dependent path-loss model in residential areas for the VHF and UHF bands. IEEE Trans. on Anten. and Propag. 2002. Vol. 50. No. 1. pp. 1-11.
  10. Паньчев А.И. Трехмерное моделирование зоны радиопокрытия WLAN в помещении. // Техника радиосвязи. 2014. Вып. 2(22). С. 23-32.
  11. Паньчев А.И. Алгоритм трехмерной трассировки радиоволн локальной беспроводной сети. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 11(136). С. 31-41.

- 12.Панычев А.И., Дубинская И.В. Синтез лучевой траектории проникновения сигналов WLAN в смежные помещения. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 5(142). С. 116-122.
- 13.Panychev A.I., Vaganova A.A. Three-dimensional Tracing of WLAN Signals Between Rooms. 25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). 2015. Vol. 1. pp. 211-212.
- 14.Панычев А.И. Учет поляризационных эффектов в канальной матрице локальной MIMO-системы. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 11(160). С. 86-93.
- 15.Панычев А.И., Ваганова А.А. Анализ многолучевой структуры электромагнитного поля в помещении с группой препятствий. // Известия ЮФУ, Технические науки. 2016. № 3(176). С. 53-65.
16. Panychev A.I., Vaganova A.A. Modeling of Ray Refraction of WLAN Signals on the Structural Elements of the Building. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Moscow. 2016. IEEE Catalog Number: CFP16794-CDR. С. 7491718.

**Ссылка на статью:**

А. И. Панычев, А. В. Максимов, А. А. Ваганова. Учет неровности поверхностей при анализе многолучевого распространения радиоволн в помещениях. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/4/text.pdf>