

3. *Van Zelst*. Space division multiplexing algorithms // in Proc. of the 10<sup>th</sup> Mediterranean Electro-technical Conference (MELECON) 2000. – May 2000. – Vol. 3. – P. 1218-1221.
4. *Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С.* Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Антенны. – 2008. – № 11. – С. 98-104.
5. *Федосов В.П.* Пространственно-временное кодирование в системе связи на основе антенных решеток // Труды Всероссийской конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии», г. Сочи, 19-26 сентября 2004 г. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – С. 86-87.
6. *Федосов В.П., Емельяненко А.В., Гладушенко С.Г., Поморцев П.М.* Методы и алгоритмы многоканальной пространственной обработки широкополосных сигналов // Нелинейный мир. – 2012. – № 11. – С. 731-737.
7. IEEE 802.11, "IEEE P802.11, the working group for wireless LANs", Aug. 2003, <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>.
8. IEEE, "Supplement to standard for telecommunications and information exchange between systems – LAN/MAN specific requirements – part 11: wireless MAC and PHY specifications: high speed physical layer in the 5 GHz band", ISO/IEC 8802-11:1999, 1999/Amd 1:2000(E), 2000.
9. *Zelst A., Schenk T.C.W.* Implementation of a MIMO OFDM based wireless LAN system // IEEE Transactions on Signal Processing. – Feb. 2004. – Vol. 52, № 2.
10. *Мальцев А.А., Рубцов А.Е.* Исследование характеристик OFDM-систем радиосвязи с адаптивным отключением поднесущих // Радиофизика. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 5. – С. 43-49.
11. *Федосов В.П., Емельяненко А.В.* Исследование эффективности системы беспроводного доступа, сочетающей частотное и пространственно-временное кодирование на основе антенных решеток и адаптивного пространственного алгоритма в приемнике // Труды международной научной конференции ИРЭМВ-2013. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 721-725.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.А. Безуглов.

**Федосов Валентин Петрович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: [vpfedosov@sfedu.ru](mailto:vpfedosov@sfedu.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

**Емельяненко Анна Владимировна** – e-mail: [emelyanenko\\_ann\\_1990@mail.ru](mailto:emelyanenko_ann_1990@mail.ru); тел.: +79515050232; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирантка.

**Fedosov Valentin Petrovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: [vpfedosov@sfedu.ru](mailto:vpfedosov@sfedu.ru); 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Emelyanenko Anna Vladimirovna** – e-mail: [emelyanenko\\_ann\\_1990@mail.ru](mailto:emelyanenko_ann_1990@mail.ru); phone: +79515050232; the department of fundamentals of radio engineering; postgraduate student.

УДК 621.396.98

**А.И. Панычев, И.В. Дубинская**

### **АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛОВ ЛОКАЛЬНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СВЯЗИ В СМЕЖНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ**

*Преломление электромагнитных волн играет существенную роль в обеспечении радиосвязи внутри здания в условиях отсутствия прямой видимости. С целью анализа интенсивности сигналов WLAN в помещениях, смежных с местом расположения точки доступа, выполнено моделирование прохождения лучей сквозь стены здания. Преломление лучей рассмотрено в приближении геометрической оптики. Разработаны алгоритмы построения траектории и расчета интенсивности луча многократного преломления в случае пред-*

пределённого положения точки доступа и клиента сети связи. Процедура построения трехмерной трассы основана на расчете координат точек пересечения луча с каждой из преломляющих поверхностей, для чего решается система нелинейных алгебраических уравнений. Представлены некоторые результаты, иллюстрирующие эффективность предложенных алгоритмов в задачах оценки доли поля, проникшего из смежных помещений, в общей интерференционной картине распределения интенсивности сигналов WLAN.

WLAN; метод геометрической оптики; преломление лучей; алгоритм; лучевая трассировка.

**A.I. Panychev, I.V. Dubinskaya**

### **ANALYSIS OF THE WIRELESS LOCAL AREA NETWORK SIGNALS INTENSITY IN ADJACENT ROOMS**

*Refraction of electromagnetic waves plays a significant role in ensuring the wireless inside the building without direct visibility. The modeling of rays passage through the building walls is carried out with the purpose of the analysis of WLAN signals intensity in premises adjacent to the place of the access point location. The refraction of rays is considered in the approximation of geometrical optics.*

*The algorithms for constructing the trajectory calculation of the intensity of the beam multiple refraction in the case of a predefined position access points and client network connection are designed. The procedure for constructing three-dimensional route is based on the calculation of the ray intersection points coordinates with each of the refractive surfaces, for which solved by a system of nonlinear algebraic equations. Presents some results, illustrating the efficiency of proposed algorithms in problems of estimating the share of the field, passing from adjacent premises in the global interference pattern of the WLAN signals intensity distribution.*

WLAN; geometrical optics method; rays refraction; algorithm; rays tracing.

Оценке уровня сигналов беспроводных локальных сетей связи внутри здания посвящено много исследований, в которых развиваются различные варианты статистических и детерминистских методов [1–6]. В работе [7] предложен алгоритм трехмерной лучевой трассировки, отличительной особенностью которого является предварительный анализ состава прямых, отраженных, преломленных и дифрагировавших лучей, приходящих в точку приема при заданном расположении внутри помещения передатчика и приемника. В рамках такого подхода при построении траектории луча, прошедшего сквозь препятствие, заранее не известен угол падения луча на преломляющую поверхность. В статье [8] описана процедура синтеза лучевой траектории проникновения сигналов WLAN через одиночную преграду, позволяющая по геометрическим параметрам задачи восстановить точки преломления луча. Обобщим этот алгоритм на случай произвольного числа преломляющих поверхностей.

Рассмотрим задачу в следующей постановке. Пространство разделено плоскостями  $1, 2, \dots, N$ , моделирующими поверхности стены, перекрытия, колонны или другой конструкции здания, на  $N+1$  областей (рис. 1). Взаимное расположение плоскостей произвольное. В общем случае электрофизические параметры всех областей различны. «Верхняя» область с параметрами  $\varepsilon_1, \mu_1$  содержит источник электромагнитного поля в точке  $p^f$ , которая удалена от плоскости  $1$  настолько, что падающее поле является локально плоским. «Внутренние» области имеют параметры  $\varepsilon_2, \mu_2, \varepsilon_3, \mu_3, \dots, \varepsilon_N, \mu_N$ , характеризующие материалы, из которых состоят конструкции здания. В «нижнем» полупространстве с параметрами  $\varepsilon_{N+1}, \mu_{N+1}$  расположена точка  $p^r$ , в которой анализируется уровень прошедшего сквозь преграду поля.

Решение задачи в приближении метода геометрической оптики представляет собой координаты точек преломления  $p_1, p_2, \dots, p_N$  на каждой из поверхностей, через которые проходит луч на пути от точки передатчика  $p^f$  до точки приемника  $p^r$ . Таким образом, задача состоит в синтезе траектории по заданным позициям начала и конца трассы.

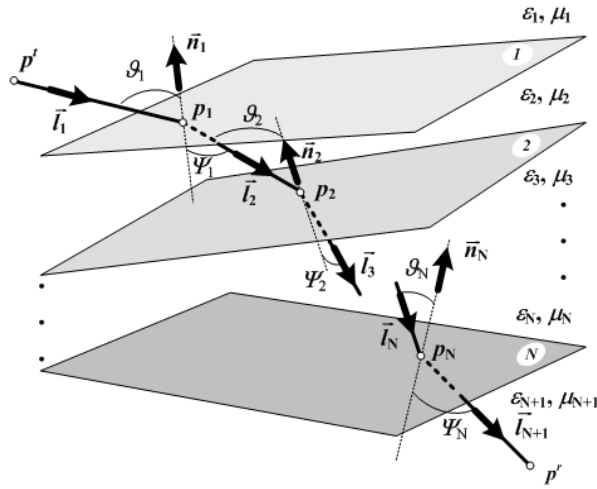


Рис. 1. Постановка задачи

Преломление геометрических лучей плоской поверхностью описывается законом Снеллиуса. Особенностью рассматриваемой системы плоскостей является то, что луч, преломленный поверхностью  $i$ , является падающим на поверхность  $i+1$ . Закон Снеллиуса для каждой из плоскостей удобно представить в виде векторного соотношения, связывающего направления падающего и преломленного лучей [9]:

$$\vec{l}_i - \vec{n}_i(\vec{n}_i, \vec{l}_i) = m_i[\vec{l}_{i+1} - \vec{n}_i(\vec{n}_i, \vec{l}_{i+1})], \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где  $\vec{l}_i$  и  $\vec{l}_{i+1}$  – орты падающего и преломленного лучей для  $i$ -й поверхности;  $\vec{n}_i$  – внешняя нормаль к  $i$ -й плоскости (направлена в сторону падающего луча);  $m_i = \sqrt{\frac{\epsilon_i \mu_i}{\epsilon_{i+1} \mu_{i+1}}} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \psi_i}$  – отношение показателей преломления сред, разделяемых  $i$ -й плоскостью;  $\theta_i$  – угол падения луча (угол между векторами  $\vec{n}_i$  и  $-\vec{l}_i$ );  $\psi_i$  – угол преломления луча (угол между векторами  $-\vec{n}_i$  и  $\vec{l}_{i+1}$ ).

Орты падающего и преломленных лучей могут быть выражены через искомыми координаты точек преломления  $p_1, p_2, \dots, p_N$  и известные координаты передатчика и приемника  $p^t, p^r$ :

$$\vec{l}_1 = \frac{\vec{p}_1 - \vec{p}^t}{|\vec{p}_1 - \vec{p}^t|}; \quad \vec{l}_i = \frac{\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i}{|\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i|}, \quad i = 1, \dots, N-1; \quad \vec{l}_{N+1} = \frac{\vec{p}^r - \vec{p}_N}{|\vec{p}^r - \vec{p}_N|}, \quad (2)$$

где  $\vec{p}^t, \vec{p}^r, \vec{p}_i, i=1, \dots, N$  – радиус-векторы соответствующих точек.

С учетом (2) выражение (1) преобразуется в систему  $N$  векторных уравнений относительно координат точек преломления лучей на каждой из поверхностей:

$$\vec{l}_i - m_i \vec{l}_{i+1} - \vec{n}_i[(\vec{n}_i, \vec{l}_i) - m_i(\vec{n}_i, \vec{l}_{i+1})] = 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Решением системы уравнений (3) является набор  $N$  векторов, каждый из которых представляет собой радиус-вектор точки преломления рассчитываемого луча на разграничивающих поверхностях. Решение может быть получено градиентным численным итерационным методом. Хорошим начальным приближением является вектор, составленный из координат точек пересечения с преломляющими поверхностями прямой, соединяющей точки передатчика и приемника, т.е. «пря-

мого луча», который существовал бы в отсутствие преломляющих плоскостей. Отбор корней, удовлетворяющих рассматриваемой задаче, производится на основе следующих условий: 1) искомая точка находится на преломляющей поверхности; 2) каждая координата искомой точки принадлежит промежутку между соответствующими координатами точек расположения источника и приемника.

Таким образом, итогом синтеза траектории многократно преломленного луча сигнала WLAN внутри здания является множество координат точек  $p^l, p_1, \dots, p_N, p^r$ . Эти координаты представляют исчерпывающую информацию для энергетического расчета зоны покрытия беспроводной локальной сети, позволяя определить: 1) факт существования преломленного луча в анализируемой точке приема, являющийся необходимым и достаточным условием для выполнения дальнейшего вычисления парциального комплексного коэффициента передачи преломленного луча; 2) направление выхода луча из точки передатчика, что позволяет учесть направленные свойства передающей антенны; 3) направление прихода луча в точку приема, что дает возможность задействовать диаграмму направленности приёмной антенны; 4) углы падения на каждую преломляющую поверхность, необходимые для расчета коэффициентов преломления и количественной оценки поляризационных эффектов; 5) длину луча в каждой среде, на основании чего рассчитываются основное затухание и фаза волны в конце трассы.

Рис. 2 иллюстрирует применение алгоритма синтеза траектории луча, прошедшего сквозь помещение, преодолев при этом две кирпичные стены.

Представлено три характерных варианта взаимного расположения точек передатчика и приемника. Для каждого варианта приведено три ракурса, формирующие представление об объемной картине траектории луча. Все представленные траектории многократно преломленных лучей полностью согласуются с постулатами геометрической оптики и законом преломления Снеллиуса.

Расчет интенсивности сигналов беспроводной локальной сети, учитывающий все основные механизмы многолучевого распространения радиоволн внутри зданий – отражения от внутренних поверхностей помещения, прохождение сквозь конструктивных элементов зданий – может быть выполнен с использованием множителя влияния среды распространения [7]:

$$V = 1 + \sum V^{refr} + \sum V^{pass} + \sum V^{difr}.$$

Выражение для компонента множителя влияния среды, учитывающего прохождение через стены, перекрытия и другие препятствия, расположенные в здании, можно получить на основе известных электродинамических моделей:

$$\begin{aligned} \sum V_{\parallel, \perp}^{pass} = & \frac{F^l(\theta^l, \phi^l) F^r(\theta^r, \phi^r)}{F^l(\theta_0^l, \phi_0^l) F^r(\theta_0^r, \phi_0^r)} \frac{R_0}{e^{-jk_1 R_0}} \left[ \prod_{i=1}^N T_{\parallel, \perp, i}(\mathcal{G}_i) \xi_i \times \frac{e^{-j \sum_{i=1}^{N+1} k_i R_i}}{\sum_{i=1}^{N+1} R_i} + \right. \\ & + \sum_{s=1}^S \prod_{s=1}^S R_{\parallel, \perp, s}(\mathcal{G}_s) \xi_s \prod_{q=1}^Q T_{\parallel, \perp, q}(\mathcal{G}_q) \xi_q \times \frac{e^{-j \sum_{q=1}^{Q+1} k_q R_q}}{\sum_{q=1} R_q} + \\ & \left. + \sum D_{\parallel, \perp} \sqrt{\frac{R_{1D}}{R_{2D}(R_{1D} + R_{2D})}} \xi_D \prod_{g=1}^G T_{\parallel, \perp, g}(\mathcal{G}_g) \xi_g \times \frac{e^{-j \sum_{g=1}^{G+1} k_g R_g}}{\sum_{g=2}^{G+1} R_g} + \dots \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $F^t(\theta_0^t, \theta_0^t)$  и  $F^r(\theta_0^r, \theta_0^r)$  – выборки из нормированных диаграмм направленности в направлении на другую антенну;  $\theta^t, \varphi^t$  – углы выхода луча из передающей антенны;  $\theta^r, \varphi^r$  – углы прихода луча к приемной антенне;  $T_{\parallel, \perp, i}$  – коэффициент прохождения луча через  $i$ -ю преломляющую поверхность (учитываются обе поперечные составляющие в падающей электромагнитной волне: параллельно (индекс « $\parallel$ ») и нормально (индекс « $\perp$ ») поляризованные) [10];  $\mathcal{G}_i$  – угол падения луча на  $i$ -ю преломляющую поверхность;  $\xi_i$  – коэффициент, учитывающий деполаризационные эффекты при преломлении луча [11];  $R_i$  – протяженность трассы луча в  $i$ -й среде, в соответствии с (2)  $R_1 = |\vec{p}_1 - \vec{p}^t|$ ,  $R_{N+1} = |\vec{p}^r - \vec{p}_N|$  и  $R_i = |\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i|$  для  $i=2, \dots, N$ ;  $R_0 = |\vec{p}^r - \vec{p}^t|$  – расстояние прямой видимости между передатчиком и приемником;  $R_{\parallel, \perp, s}$  – коэффициенты отражения от поверхностей [10];  $D_{\parallel, \perp}$  – коэффициенты дифракции на ребре [9];  $R_{1D}, R_{2D}$  – расстояния от передающей антенны до точки дифракции и от точки дифракции до точки первого преломления.

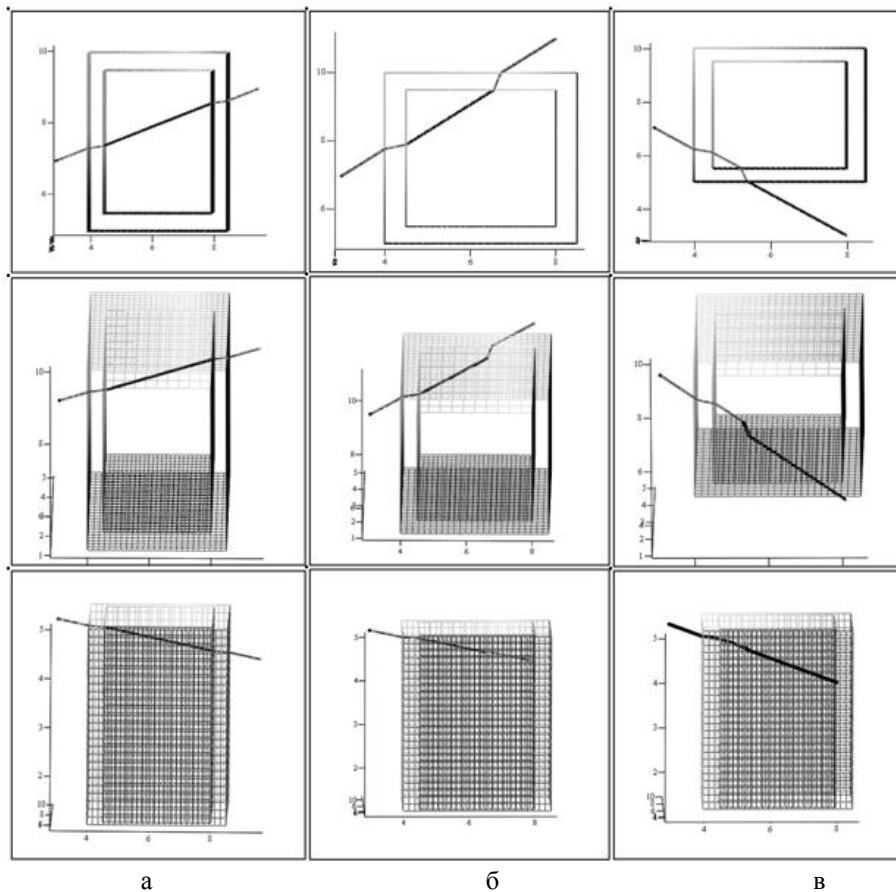


Рис. 2. Примеры синтеза траектории многократно преломленного луча внутри здания

Первое слагаемое в (4) описывает луч, приходящий к точке приема только путем проникновения сквозь преграды, образованные  $N$  преломляющими поверхностями. Второе слагаемое соответствует случаю, когда помимо прохождения сквозь преграды луч несколько раз отражается. Очевидно, что лучей такой структуры может быть множество. Третье слагаемое соответствует варианту, когда луч последовательно претерпевает дифракцию на кромке и несколько проникновений сквозь преграды. Лучей такой структуры также может быть несколько.

В случае, когда в многолучевую модель распространения сигналов беспроводной локальной сети вводятся лучи другой структуры, выражение (4) дополняется новыми слагаемыми. Так, слагаемое, учитывающее комбинацию отражения, дифракции и преломления луча может быть сформировано аналогично приведенным примерам.

На рис. 3 представлены распределения интенсивности преломленных лучей в строительной конструкции, имитирующей изолированное помещение  $4 \times 7$  м с кирпичными стенами толщиной 0,5 м. Передатчик расположен в точке  $p'$  вне помещения вблизи его левого верхнего угла (в плане). Конструкция антенны передатчика описана в [12]. Учитываются только лучи, проходящие через преграды, в соответствии с первым слагаемым в (4). Распределение рассчитано в горизонтальной плоскости, совпадающей с уровнем передатчика, для двух случаев поляризации радиоволн: параллельной (рис. 3,а) и нормальной (рис. 3,б).

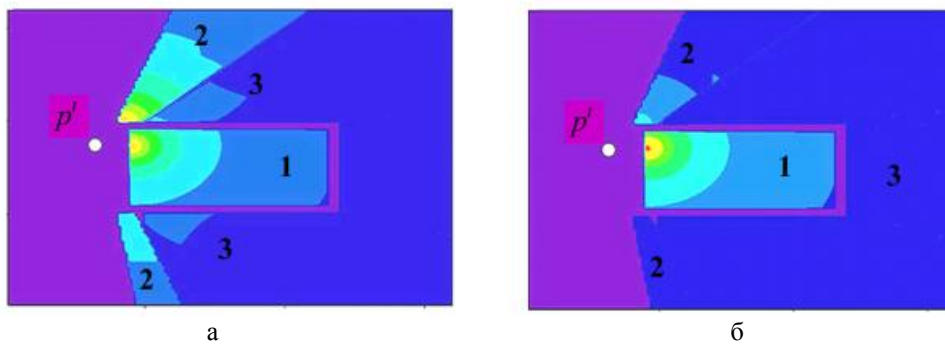


Рис. 3. Распределение интенсивности преломленных лучей

В распределении интенсивности преломленных радиоволн четко прослеживаются несколько зон, образованных лучами с различной структурой траектории. Зона 1 соответствует лучам внутри помещения, прошедшим через одну стену и, следовательно, претерпевшим двукратное преломление. Зона 2 образуется вне помещения двукратно преломленными лучами, которые прошли сквозь угол помещения, т.е. через примыкание смежных стен. Зона 3 соответствует лучам четырехкратного преломления вне помещения, преодолевшим смежные или противоположные стены, захватывая внутреннее пространство помещения.

Для лучей с параллельной поляризацией (рис. 3,а) в зоне 1 у стены, ближайшей к передатчику, ослабление составляет около 8 дБ, у противоположной стены затухание достигает уже 15 дБ. Уменьшение интенсивности лучей в зоне 2 происходит быстрее, что объясняется большей протяженностью трассы внутри кирпичной кладки. В зоне 3 ослабление луча примерно на 8 дБ больше, чем в соответствующей части зоны 1. В итоге при четырехкратном преломлении луча его затухание составляет не менее 25 дБ.

Для лучей с нормальной поляризацией (рис. 3,б) картина распределения интенсивности аналогичная, однако ослабление больше примерно на 7 дБ.

Таким образом, решение системы векторных уравнений относительно координат точек преломления луча на поверхности каждого препятствия однозначно определяет геометрические параметры, необходимые для расчета интенсивности сигналов локальной беспроводной сети связи в помещениях, примыкающих к месту расположения точки доступа WLAN.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.
2. *Madej P.* 3D Wireless Networks Simulator – Visualization of Radio Frequency Propagation for WLANs // Dissertation. Univ. of Dublin, Trinity College, 2006.
3. *Torres R.P. a.o.* CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless System in Enclosed Spaces // Antennas and Propagation Magazine. – 1999. – Vol. 41, № 4. – P. 11-21.
4. *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, № 2. – P. 387-407.
5. *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, № 2. – P. 398-408.
6. *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, № 2. – P. 409-422.
7. *Панычев А.И.* Алгоритм трехмерной трассировки радиоволн локальной беспроводной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 31-41.
8. *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.
9. *Боровиков В.А. и Кинбер Б.Е.* Геометрическая теория дифракции. – М.: Связь, 1978. – 248 с.
10. *Петров Б.М.* Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 2000. – 559 с.
11. *Панычев А.И.* Учет поляризационных эффектов в канале системы WLAN // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 215-220.
12. *Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Кардос Д.А.* Оптимизация параметров комбинированной микрополосковой антенны // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11(136). – С. 25-31.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.А. Зинченко.

**Панычев Андрей Иванович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ruu2011@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

**Дубинская Изабелла Витальевна** – e-mail: izabelladiv@yandex.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирантка.

**Panychev Andrey Ivanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ruu2011@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Dubinskaya Izabella Vitalievna** – e-mail: izabelladiv@yandex.ru; the department of antennas and radio transmitters; postgraduate student.