

Таким образом, с помощью описанного способа регулирования и проведенных технических модернизаций удалось достичь стабильной работы водонагревательного котла. Также удалось увеличить срок работы котла без вмешательства человека до двух недель, если сравнивать с аналогами, то их необходимо обслуживать каждый день [2]. С помощью описанной подачи топлива удалось обеспечить более экономичный режим работы по сравнению с аналогами. При проведении экспериментов выяснилось, что в момент розжига котла камера сгорания должна прогреться до температуры испарения масла – это необходимо для стабильного запуска котла. Во время тестирования котла было написано тестовое программное обеспечение, которое позволило проводить более тщательную коррекцию работы котла и записывать результаты работы для дальнейшего диагностирования.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта "Создание высокотехнологичного производства по изготовлению мобильного многофункционального аппаратно-программного комплекса длительного кардиомониторирования и эргометрии" по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Статья «Российский рынок котлов малой мощности»: [Электронный ресурс] // Энциклопедия строительства. – М., 2001-2012. URL: <http://dom.ustanovi.ru/cottage/oborud/cot> (Дата обращения: 20.02.2013).
2. Сайт Системы отопления на отработанном масле: [Электронный ресурс] // Компания ТермоАльянс. – М., 2008-2013. URL: <http://www.oilssystem.ru/> (Дата обращения: 1.03.2013).
3. Статья «Теплогенераторы на отработанном масле»: [Электронный ресурс] // группы компаний АСАМА "Вулкан климатических решений". – М., 2007-2013. URL: <http://www.asamagroup.ru/teplogeneratory-na-otrabotke/>. (Дата обращения: 18.02.2013).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

**Акользин Антон Николаевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: [anton.akolzin@gmail.com](mailto:anton.akolzin@gmail.com); г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 89185909294; кафедра микропроцессорных систем; аспирант.

**Akol'zin Anton Nikolaevich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: [anton.akolzin@gmail.com](mailto:anton.akolzin@gmail.com); 81, Peterovskaya street, Taganrog, Russia; phone: +79185909294; the department of microprocessor systems; Postgraduate student.

УДК 621.396.98

**А.И. Паньчев**

#### **УЧЕТ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В КАНАЛЕ СИСТЕМЫ WLAN**

*Рассмотрено явление деполаризации радиоволн в условиях многолучевого распространения сигналов беспроводной локальной сети связи внутри здания. Для количественной оценки ослабления сигналов в канале WLAN вследствие этого эффекта предложен поляризационный коэффициент передачи по полю. Разработана трехмерная геометрооптическая модель лучевой трассировки в помещении, учитывающая изменение поляризации при отражениях от стен и препятствий, а также при произвольном размещении передающей и приемной антенн. Поляризационные эффекты при отражении описываются функцией*

преобразования вектора поляризации, использующей коэффициенты отражения для параллельной и перпендикулярной составляющих вектора. Представлены результаты моделирования распределения модуля поляризационного коэффициента передачи в помещении с препятствием. Показано, что при углах поворота передающего линейного излучателя более 45 градусов относительно приемного вибратора на значительной площади горизонтального сечения преобладает паразитная поляризационная составляющая.

WLAN; поляризация; поляризационный коэффициент; лучевая трассировка; отражение; метод геометрической оптики.

**A.I. Panychev**

### ACCOUNTING FOR POLARIZATION EFFECTS IN THE WLAN SYSTEM CHANNEL

*The phenomenon of depolarization wave propagation in conditions of multibeam distribution-of signal of the wireless LAN connection inside the building is considered. For the quantitative assessment of the signal weakening in the WLAN channel as a consequence of this effect a field polarization transfer factor is proposed. A three-dimensional geometrical optics model of rays tracing in the room, taking into account the change of polarization with reflections from the walls and obstacles, as well as the random placement of transmitting and receiving antenna is developed. Polarization effects in reflection describes by transformation function of the vector polarization, which used the coefficients of reflection for parallel and perpendicular components of the vector. The results of simulation of the distribution of the module of the polarization coefficient of transmission in the room with the obstacle are presents. It is shown that in the rotation angles of the transmission line antenna more than 45 degrees with respect to the reception vibrator on a large area of horizontal section predominant parasite polarization component.*

WLAN, polarization; polarization transfer factor; rays tracing; reflection; geometrical optics method.

В работе [1] предложен алгоритм трехмерной лучевой трассировки радиоволн, пригодный для анализа многолучевого распространения сигналов WLAN в помещении. Наиболее общей характеристикой канала связи является комплексный коэффициент передачи по полю  $h$ . Для локальных беспроводных сетей связи внутри здания применима модель радиолинии с наличием в учитываемых зонах Френеля плоских отражающих поверхностей. В рамках этой модели полагается, что передающая и приемная антенны находятся в дальних зонах друг друга, вследствие чего коэффициент передачи канала по полю представляется как [2, 3]:

$$h = \sqrt{D^t D^r F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t) F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r) L_0 L_0^{pol} L^t L^r V}. \quad (1)$$

Поляризационные явления, сопутствующие распространению радиоволн в сложной обстановке помещения, учитываются сомножителями  $L_0^{pol}$  и  $V$ .

Задача анализа поляризационных эффектов в радиоканале системы WLAN рассмотрена в следующей постановке. Помещение и расположенное в его объеме препятствие представляют собой произвольные выпуклые тела, поверхности которых аппроксимированы плоскими фрагментами. На рис. 1 приведен распространенный практический случай: помещение имеет форму прямоугольного параллелепипеда, а препятствие – наклонного параллелепипеда. Показаны основной луч **0** и, для примера, луч однократного отражения от одной из внутренних поверхностей – луч **3**. Необходимо составить расчетные выражения комплексного поляризационного коэффициента передачи по полю для прямого луча, а также для отраженного, преломленного и дифракционного лучей.

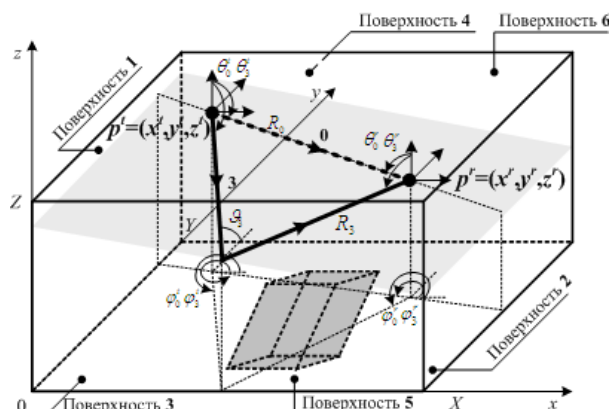


Рис. 1. Геометрия задачи

Для решения задачи введена глобальная декартова система координат (ДСК)  $(x, y, z)$ , главные плоскости которой совмещены с поверхностями параллелепипеда, имитирующего помещение. Также введены две локальные ДСК, полученные параллельным переносом глобальной ДСК в фазовые центры (центры излучения) передающей  $p^t = (x^t, y^t, z^t)$  и приемной  $p^r = (x^r, y^r, z^r)$  антенн.

Поляризационный коэффициент передачи прямого луча  $\mathbf{0}$  представляет собой множитель  $L_0^{pol}$  из (1) и определяет степень рассогласования передающей и приемной антенн по поляризации вследствие особенностей их конструкций и взаимного позиционирования. Этот коэффициент отвечает требованию  $0 \leq |L_0^{pol}| \leq 1$  и определяется как скалярное произведение единичных векторов поляризации передающей и приёмной антенн [2]:

$$L_0^{pol}(p^r, p^t) = \bar{\xi}^t(p^r, p^t) \cdot \bar{\xi}^{r*}(p^r, p^t),$$

символ «\*» означает комплексное сопряжение.

Векторы  $\bar{\xi}^t$  и  $\bar{\xi}^r$  задаются комплексными векторными нормированными характеристиками направленности антенн и выражаются в общем поляризационном базисе в принадлежащей приемной антенне локальной сферической системе координат (ССК).

Характерной особенностью систем WLAN является произвольная и часто непредсказуемая ориентация обеих антенн, как это рассмотрено, например, в [4]. Учитывая конструктивную реализацию используемых в системах WLAN антенн, изменение их положения в пространстве удобно задавать вращением вокруг координатных осей локальных ДСК, например, последовательно вокруг осей  $x, y, z$  в положительном направлении на углы  $\psi_x, \psi_y, \psi_z$ . В этом случае в выражении (2)

под векторами  $\bar{\xi}^t$  и  $\bar{\xi}^r$  понимаются векторы поляризации, пересчитанные из исходной («повернутой») локальной ССК в сферическую систему, связанную с локальной ДСК соответствующей антенны:

$$\bar{\xi}^t = \bar{\xi}_0^t \cdot \Omega \cdot \Psi^t \cdot \Omega^T, \quad \bar{\xi}^r = \bar{\xi}_0^r \cdot \Omega \cdot \Psi^r \cdot \Omega^T,$$

где  $\bar{\xi}_0^t$  и  $\bar{\xi}_0^r$  – векторы поляризации антенн в исходной ССК;

$\Psi^t$  и  $\Psi^r$  – матрицы перехода от старого репера к новому, для заданной последовательности вращений вокруг осей ДСК, имеющие одинаковую структуру вида

$$\Psi = \begin{pmatrix} \cos \psi_y \cos \psi_z & \cos \psi_x \sin \psi_z + \sin \psi_x \sin \psi_y \cos \psi_z & \sin \psi_x \sin \psi_z - \cos \psi_x \sin \psi_y \cos \psi_z \\ -\cos \psi_y \sin \psi_z & \cos \psi_x \cos \psi_z - \sin \psi_x \sin \psi_y \sin \psi_z & \sin \psi_x \cos \psi_z + \cos \psi_x \sin \psi_y \sin \psi_z \\ \sin \psi_y & -\sin \psi_x \cos \psi_y & \cos \psi_x \cos \psi_y \end{pmatrix};$$

$\Omega$  – матрица перехода от базиса ССК к базису ДСК:

$$\Omega = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \\ \cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi & -\sin \theta \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \end{pmatrix}.$$

Поляризационный коэффициент передачи по полю для луча однократного отражения от одной из внутренних поверхностей помещения входит в состав множителя влияния среды  $V$  в выражении (1). Величина  $V$  в приближении геометрической оптики учитывает многолучевой характер распространения сигнала и характеризует амплитудные, фазовые и поляризационные параметры каждого из отраженных, преломленных или дифракционных лучей [5, 6].

В частности, для луча, отразившегося от поверхности  $s$ , можно записать его вклад в полученное в [1] общее выражение для множителя влияния среды  $V$  в виде

$$V_s^{refl} = \frac{L_s^{pol} F^t(\theta_s^t, \varphi_s^t) F^r(\theta_s^r, \varphi_s^r) R_0}{L_0^{pol} F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t) F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r) R_s} e^{-jk(R_s - R_0)}, \quad (2)$$

где  $L_s^{pol} = \vec{\xi}_s^t \cdot \vec{\xi}_0^{r*}$  – поляризационный коэффициент передачи луча  $s$ ;

$\vec{\xi}_s^t$  – единичный вектор поляризации отраженной радиоволны в точке приема:

$$\vec{\xi}_s^t = \vec{\xi}_0^t \cdot \Omega \cdot \Psi^t \cdot P_s \cdot R_s \cdot P_s^{-1} \cdot \Omega^T; \quad (3)$$

$P_s$  и  $P_s^{-1}$  – векторная функция, формирующая параллельную  $\xi_{\parallel s}^t$  и перпендикулярную  $\xi_{\perp s}^t$  составляющие вектора поляризации относительно плоскости падения волны на поверхность  $s$ , и функция, выполняющая обратный переход к трем декартовым составляющим вектора поляризации;

$R_s = (R_{\parallel s}(\mathcal{G}_s) \quad R_{\perp s}(\mathcal{G}_s))^T$  – вектор-столбец, содержащий коэффициенты отражения от поверхности  $s$  для параллельной и перпендикулярной составляющих падающей волны.

Парциальный множитель влияния среды  $V_s^{pass}$  для прошедшего сквозь препятствие луча вычисляется аналогично (2). Входящий в его состав поляризационный коэффициент передачи дважды преломленного луча определяется коэффициентами преломления на первой  $T_{\parallel s}(\mathcal{G}_s)$ ,  $T_{\perp s}(\mathcal{G}_s)$  и второй  $T_{\parallel s'}(\mathcal{G}_{s'})$ ,  $T_{\perp s'}(\mathcal{G}_{s'})$  границах. На основе (3) вектор поляризации прошедшей сквозь поверхности  $s$  и  $s'$  волны получается в виде

$$\vec{\xi}_{s s'}^t = \vec{\xi}_0^t \cdot \Omega \cdot \Psi^t \cdot P_s \cdot T_s \cdot P_s^{-1} \cdot P_{s'} \cdot T_{s'} \cdot P_{s'}^{-1} \cdot \Omega^T.$$

Поляризационный коэффициент передачи по полю для луча, дифрагировавшего на неоднородности поверхности  $s$ , входит в выражение парциального множителя влияния среды  $V_s^{diffr}$ , аналогичное (2). Выражение имеет такую же струк-

туру, как и (3). Отличие состоит в том, что используются коэффициенты дифракции для параллельной  $D_{\parallel s}(\mathcal{G}_s)$  и перпендикулярной  $D_{\perp s}(\mathcal{G}_s)$  поляризаций:

$$\vec{\xi}_s^t = \vec{\xi}_0^t \cdot \Omega \cdot \Psi^t \cdot P_s \cdot D_s \cdot P_s^{-1} \cdot \Omega^T.$$

Для иллюстрации важности учета поляризационных эффектов в канале связи локальной беспроводной сети проведено моделирование распределения модуля поляризационного коэффициента передачи WLAN стандарта IEEE 802.11 b/g в горизонтальном сечении помещения. Геометрические параметры помещения: длина  $X = 20$  м, ширина  $Y = 10$  м, высота  $Z = 5$  м. Препятствие в форме вертикальной прямоугольной колонны с длинами сторон 1 м расположено в середине помещения. Все конструкции изготовлены из бетона. Рабочая длина волны 12,5 см. Передающая и приемная антенны расположены на высоте 1,8 м и имеют линейную вертикальную поляризацию. Их векторы поляризации в локальных ССК характеризуются только угломестной компонентой.

На рис. 2 приведены результаты расчетов модуля поляризационного коэффициента передачи для прямого луча при различных значениях угла  $\psi_x^t$  поворота передающего полуволнового вибратора вокруг оси  $x$ , приемный вибратор расположен вертикально на одной высоте с передающей антенной.

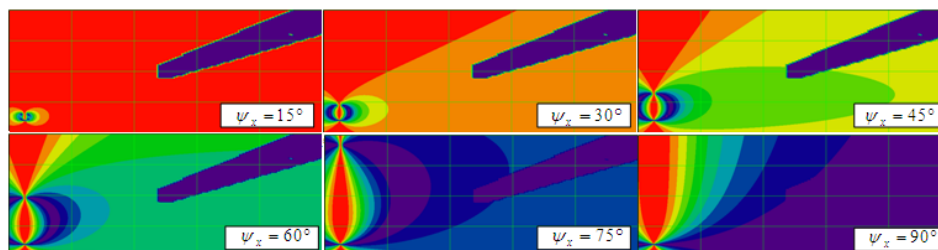


Рис. 2. Распределение модуля поляризационного коэффициента передачи по полю прямого луча при различных углах наклона передающего вибратора вокруг оси  $x$

Аналогичные зависимости при повороте передающей антенны на угол  $\psi_y^t$  вокруг оси  $y$  представлены на рис. 3.

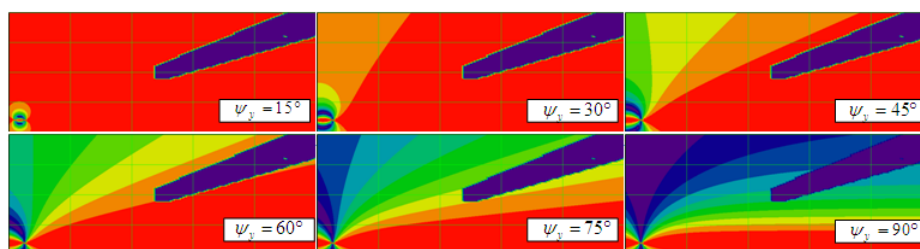


Рис. 3. Распределение модуля поляризационного коэффициента передачи по полю прямого луча при различных углах наклона передающего вибратора вокруг оси  $y$

Приведенные распределения поляризационного коэффициента демонстрируют существенное влияние поляризации радиоволн на величину сигнала в приемной антенне. Так, при незначительном отклонении передающего вибратора от вертикали сохраняется практически полное согласование его поляризации с приемной антенной. При углах поворота более  $45^\circ$  на значительной площади горизонтального сечения преобладает паразитная поляризационная составляющая, что делает невозможной качественную передачу сигнала.

На рис. 4 изображены результаты серии расчетов для лучей, отраженных от различных внутренних поверхностей помещения (см. рис. 1) при вертикальном расположении передающего и приемного вибраторов.

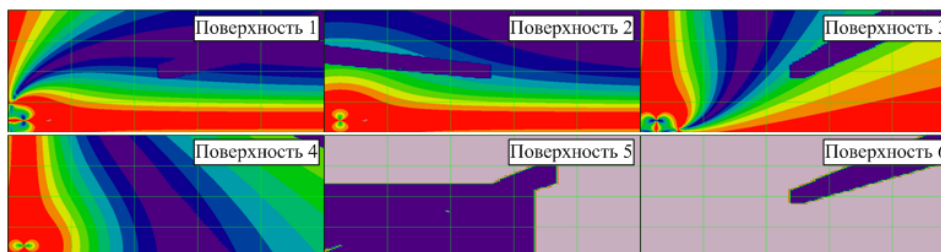


Рис. 4. Распределение модуля поляризационного коэффициента передачи по полю для лучей, отраженных от различных внутренних поверхностей помещения

Модуль поляризационного коэффициента передачи лучей, отраженных от стен (поверхности 1, 2, 3 и 4), существенно зависит от положения приемной антенны, и на большей площади горизонтального сечения объема помещения наблюдается переход вектора на кроссполяризационное направление. Для лучей, отраженных от пола и потолка (поверхности 5 и 6), напротив, во всем горизонтальном сечении, за исключением области тени, сохраняется согласная поляризация приемного и передающего вибраторов.

Таким образом, полученные расчетные формулы позволяют дать количественную оценку поляризационной эффективности канала локальной беспроводной сети связи в конкретном помещении. Предложенный подход к расчету поляризационного коэффициента передачи по полю канала связи может быть полезен в задачах обеспечения равномерного покрытия зоны обслуживания системы WLAN.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панычев А.И. Алгоритм трехмерной трассировки радиоволн локальной беспроводной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 31-41.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
3. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 2000. – 559 с.
4. Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Кардос Д.А. Оптимизация параметров комбинированной микрополосковой антенны // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). С. 25-31.
5. Панычев А.И. Трассировка многолучевого распространения радиоволн внутри зданий // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия «Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР)». Научн.-техн. сборник. Вып. 1. – М.-Таганрог, 2012. – С. 182-187.
6. Панычев А.И. Алгоритм трассировки лучей внутри зданий // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды Междунар. научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн – ИРЭМВ-2011». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 371-375.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Зори.

**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.: 88634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

**Panychev Andrei Ivanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ruu2011@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371733; the department of chair of aerials and radio sending devices; cand. of eng. sc.