

Тарасенко Андрей Васильевич – e-mail: andtarasenk@yandex.ru; кафедра радиоприемных устройств и телевидения; аспирант.

Galoustov Gennady Grigor'evich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: rpru@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371626; the department of radio receivers and television; dr. of eng. sc.; professor.

Brovchenko Sergey Petrovich – e-mail: rpru2@tsure.ru; the department of radio receivers and television; cand. of eng. sc.; senior research; associate professor.

Tarasenko Andrey Vasil'evich – e-mail: andtarasenk@yandex.ru; the department of radio receivers and television; postgraduate student.

УДК 004.93'12, 004.93'14

В.П. Федосов, А.В. Емельяненко

**УСТОЙЧИВОСТЬ К ОШИБКАМ В ОЦЕНКЕ ВЕСОВЫХ ВЕКТОРОВ
АДАПТИВНОГО ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АЛГОРИТМА
РАДИОСВЯЗИ НА АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ В РЕЛЕЕВСКОМ КАНАЛЕ**

Рассмотрена эффективность использования адаптивного алгоритма для широкополосных беспроводных систем связи в условиях релейского канала. Объектом исследования является система передачи информации с многомерными сигналами (OFDM и MIMO-OFDM), применяемая для организации широкополосной связи в условиях многолучевых (многопутных) каналов. Предметом исследования является проблема повышения пропускной способности и снижения вероятности битовой ошибки систем передачи на основе сигналов высокой размерности в условиях радиоканалов с частотно-временным рассеянием. Проведен анализ влияния погрешности оценки коэффициентов весовых векторов в адаптивном пространственно-временном алгоритме радиосвязи на антенных решетках с пространственным кодированием. Анализ показывает, что в таком алгоритме при неточной установке оптимальных весовых векторов, диаграмма направленности блоков ориентирует максимум неточно в направлении прихода полезного сигнала по пути с наибольшей мощностью. При изменении аргументов весовых коэффициентов вероятность появления ошибки принятых символов повышается. Так, при отношении сигнал/шум 16 дБ вероятность битовой ошибки увеличивается приблизительно в 5 раз. А при изменении модуля весовых коэффициентов вероятность появления ошибки возрастает несколько слабее. Это можно объяснить тем, что в канале радиосвязи используется фазовая антенная решетка, поэтому система менее устойчива к разбросу весовых коэффициентов по аргументу, а не по модулю.

Радиосвязь; релейский канал; обработка пространственно-временных сигналов; адаптация; устойчивость к ошибкам весовых коэффициентов.

V.P. Fedosov, A.V. Emelyanenko

**STABILITY TO ERRORS IN THE ESTIMATION OF WEIGHT VECTORS
OF ADAPTIVE EXISTENTIAL ALGORITHM OF THE RADIO
COMMUNICATION ON ANTENNA LATTICES IN THE RELEY'S CHANNEL**

Efficiency of use of adaptive algorithm for broadband wireless communication systems in conditions the Rayleigh channel is considered. Object of research is the system of an information transfer with multidimensional signals (OFDM and MIMO-OFDM), applied to the organization of broadband communication in the conditions of multibeam (multipath) channels. An object of research is the problem of increase of throughput and decrease in probability of a bit error of systems of transfer on the basis of signals of high dimension in the conditions of radio channels with time-and-frequency dispersion. The analysis of influence of an error of an estimation of factors of

weight vectors in adaptive existential algorithm of a radio communication on antenna lattices with spatial coding is carried out. The analysis shows, that in this algorithm at inexact installation of optimum weight vectors, the beam of an orientation of blocks focuses a maximum is inexact in a direction of arrival of a useful signal on a way with the greatest capacity. At change of arguments of weight factors, the probability of occurrence of an error of the accepted symbols raises. So, at the relation a signal/noise 16 dB the probability of a bit error increases approximately in 5 times. And at change of the module of weight factors the probability of occurrence of an error increases a little bit more poorly. It is possible to explain it to that in the radio communication channel the phase antenna lattice is used, therefore the system is less steady against disorder of weight factors on argument, instead of on the module.

Radio communication; Rayleigh channel; processing of existential signals; adaptation; stability to errors of weight factors.

Введение. В течение XIX и XX столетий развитие коммуникаций подверглось революционным изменениям. Если в более ранних эпохах в качестве коммуникаций главным образом выступали передача речи или письма, а затем появившиеся телеграф, телефон, факс, то дальнейший переход к мобильной связи чрезвычайно улучшил и расширил возможности систем коммуникации. Теперь же, в начале XXI в., состоялся переход, который может оказаться даже более революционным, по сравнению с перечисленными выше, где использовалось применение Интернета и других видов беспроводной передачи данных. Возможность подсоединения в любое время и в любом месте к Интернету или к другим сетям передачи данных создает место для таких возможностей, о которых нельзя было бы даже думать еще вчера.

Многообещающий подход заключается в использовании нескольких антенн и в передатчике, и в приемнике (т.е., система Многократный вход Многократный выход (Multiple Input - Multiple Output, MIMO)) [1]. В такой системе пропускная способность может быть увеличена, если одновременно передавать различные потоки данных по различным передающим антеннам, но на одной и той же несущей частоте. Несмотря на то, что эти параллельные потоки данных смешиваются в эфире, они могут быть восстановлены в приемнике при использовании пространственной дискретизации (т.е. нескольких приемных антенн) и соответствующих алгоритмов обработки сигналов. Известно, что методы MIMO могут в основном быть распределены на две группы: Пространственно-временное кодирование (Space-Time Coding, STC) [2] и Пространственное разнесение (Space Division Multiplexing, SDM) [3].

Пространственно-временное кодирование позволяет увеличить устойчивость/эффективность системы радиосвязи, передавая различные виды одного и того же потока данных (посредством кодирования), на разных антеннах передатчика. В то время как пространственное разнесение достигает более высокой пропускной способности, передавая независимые потоки данных на различных передающих ветвях одновременно и на одной несущей частоте. Самое высокое повышение спектральной эффективности (в среднем) достигается тогда, когда отдельные каналы от каждой передающей антенны к каждой приемной антенне расцениваются как независимые, т.е. при отсутствии пути прямой видимости.

Постановка задачи. Рассмотрим систему MIMO с S -передатчиками и U -приемными антеннами, показанную на рис. 1 [4]. Из анализа рисунка следует, что пространственно-временное кодирование необходимо для преобразования последовательной формы кода в параллельную, и обратно – из параллельной в последовательную форму кода переданных информационных данных [5].

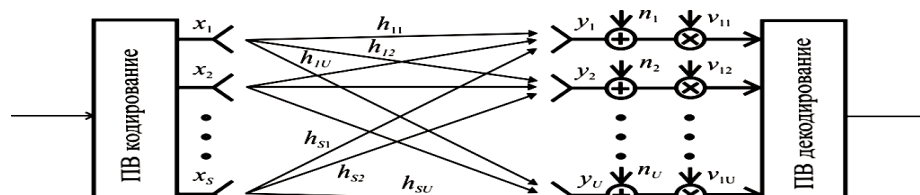


Рис. 1. Блок-диаграмма системы MIMO

Блок, который выполняет последовательно-параллельное преобразование в передатчике, является пространственно-временным кодером. Обратный процесс преобразования параллельного кода в последовательный выполняется в пространственно-временном декодере приемника. Однако пространственно-временное кодирование – это больше, чем простое изменение представления кода. Эти коды могут формировать одновременно несколько коммуникационных процессов, таких как кодирование и декодирование сигнала в канале, модуляцию и демодуляцию, мультиплексирование и демультиплексирование или коррекцию.

Переданные символы обозначены x_i , с нижним индексом, принимающим целые значения от 1 до S . Точно так же принятые сигналы обозначены r_j , где $j = 1, \dots, U$. Функция передачи канала связи от i -го элемента антенны передатчика до j -го элемента антенны приемника обозначается как h_{ji} . Для того чтобы иметь возможность сравнения системы MIMO с системой SISO (Single Input – Single Output), суммарная переданная мощность всех антенн S должна быть эквивалентна передающей мощности SISO-системы, которая обозначается как P . Тогда мощность, излучаемая каждым элементом антенны, равна P/S . Каждому элементу приемной антенны добавляются компоненты белого шума n_j . Шум имеет независимые нормальные распределения в приемных элементах антенны.

Система MIMO может быть описана в матричной форме, используя следующие обозначения, следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} y_1 &= \sum_{i=1}^S h_{1i} x_i + n_1; \\ y_2 &= \sum_{i=1}^S h_{2i} x_i + n_2; \\ &\dots \\ y_U &= \sum_{i=1}^S h_{Ui} x_i + n_U \end{aligned}$$

или в векторно-матричном виде –

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{N}. \quad (1)$$

Если расписать каждую матрицу, то получим следующее представление:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1S} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2S} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{U1} & h_{U2} & \dots & h_{US} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_U \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В выражении (1), \mathbf{Y} является вектором-столбцом размерностью $U \times 1$, состоящим из принятых сигналов y_j , \mathbf{X} – это тоже вектор-столбец $S \times 1$, составленный из переданных сигналов x_i , \mathbf{N} – вектор-столбец составляющих шума n_j и \mathbf{H} – матрица размером $S \times U$, состоящая из коэффициентов канала $h_{j,i}$ (2).

В идеальном случае скорость передачи данных систем MIMO растет линейно с ростом числа передающих антенн. Однако в общем случае максимальная скорость передачи в данной полосе (т.е. спектральная эффективность), которая может использоваться в системах MIMO, зависит от ряда параметров принимаемых сигналов, включая среднюю принятую мощность полезного сигнала, теплового и системного шума, а также помех от соседних каналов. Кроме того, многомерный статистический режим канала с замираниями MIMO имеет передовое значение для работы системы (например, влияние пространственной корреляции замираний). Поэтому для проектировщика системы связи MIMO важно иметь соответствующую модель моделирования канала MIMO (рис. 2).

Для канала MIMO взаимная информация входа и выхода максимизируется, когда входной сигнал распределен по закону Гаусса. Тогда пропускную способность MIMO-канала можно оценить из следующего выражения [6]:

$$C = \max_{\mathbf{X}} \left(\log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} \mathbf{H}^H \right) \right] \right),$$

где $\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}$ – корреляционная матрица входного сигнала, ρ – соотношение сигнал/шум.

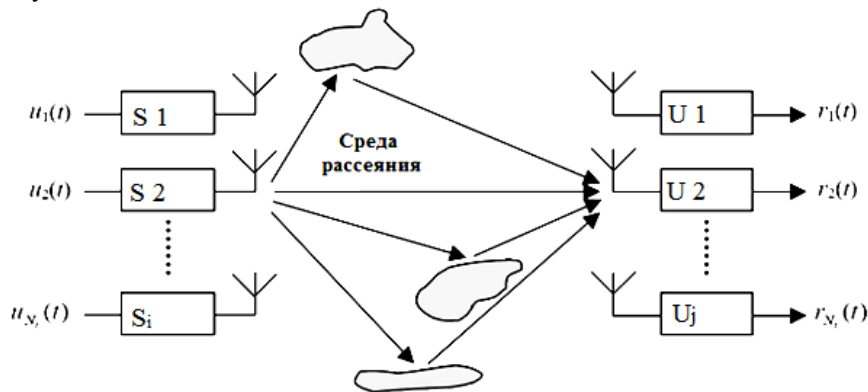


Рис. 2. Система радиосвязи MIMO, функционирующая в рассеивающей окружающей среде с переотражениями

Рассмотрим случай, когда в передатчике неизвестно состояние канала и в нем не используется адаптивное распределение мощности при передаче. В этом случае рассматривается равномерное излучение мощности каждой антенной и корреляционную матрицу $\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}$ можно записать как единичную, т.е. $\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbf{I}$. В результате преобразований получим [6]

$$C = \max \left(\log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right] \right) = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_t} \lambda_i \right),$$

где r – ранг и λ_i – положительные собственные значения матрицы \mathbf{H} .

Многие современные стандарты, такие как IEEE 802.11a [7] и IEEE 802.11g [8], основаны на ортогональном частотном уплотнении (OFDM) [9,10]. Главной причиной того, что технология OFDM была отобрана как базовая для этих стандартов, является ее способность иметь дело с наличием эффекта многопутности в каналах распространения в городе и внутри зданий. В OFDM широкополосный частотно-избирательный канал с замираниями разделен на множество ортогональ-

ных по частоте узкополосных каналов с неглубокими замираниями (т.е. на подканалы или поднесущие), из которых каждый может выравниваться тривиальным способом. Этот принцип, объединенный с кодированием, и приводит к устойчивости OFDM к узкополосной интерференции. Кроме того, возможности использования защитного интервала между последовательными символами OFDM обеспечивает эффективный механизм для борьбы с межсимвольными помехами (ISI), вызванными неблагоприятным многопутным распространением.

Система MIMO для каждой поднесущей OFDM может быть описана в матричной форме, аналогично выражениям (1) и (2).

Пропускная способность частотно-избирательного широкополосного канала, определенная в бит/с/Гц, может быть получена путем деления диапазона частот на множество узкополосных каналов и суммирования пропускных способностей по этим узкополосным каналам. При бесконечном числе узкополосных подканалов это приводит к выражению [5]

$$C = \frac{1}{B} \int_B \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H}(f) \mathbf{H}^H(f) \right) \right] df \text{ бит/с/Гц,}$$

где $\mathbf{H}(f)$ представляет частотную характеристику канала MIMO и B – ширина полосы пропускания системы. Когда диапазон частот разделен на дискретное число плоских по частоте подканалов, скажем N_c , тогда пропускная способность разомкнутой петли задается как

$$C = \frac{1}{N_c} \sum_{i=0}^{N_c-1} \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H}(i) \mathbf{H}^H(i) \right) \right] \text{ бит/с/Гц,}$$

где $\mathbf{H}(i)$ обозначает канальную матрицу i -й поднесущей (OFDM); ρ – отношение сигнал/шум по мощности.

Адаптивный алгоритм. В системах мобильной связи канал распространения, особенно в городских условиях, характеризуется наличием большого числа отражателей. Это приводит к угловой дисперсии в пространственном канале, когда источник сигнала воспринимается приемной антенной не как точечный, а как распределенный в пространстве.

Многопутность канала имеет двоякую сущность при анализе ее влияния на эффективность передачи информации, т.е. на вероятность появления битовой ошибки и пропускную способность. Наличие многих путей распространения сигнала обеспечивает повышение вероятности достижения излученного информационного поля приемной антенны, поскольку при его формировании распределение в раскрые передающей антенны произвольно изменяется во времени. В то же время, сигналы разных путей, различающихся по протяженности, достигают приемную антенну при различной взаимной задержке, что приводит к возрастанию влияния пакетов передаваемой информации друг на друга. При этом возрастает вероятность ошибочного приема. Кроме того, в раскрые приемной антенны может попадать поле активной помехи, обусловленной влиянием других систем радиосвязи при нелинейности характеристик их передатчиков.

Для того чтобы решить эту проблему, был разработан адаптивный алгоритм. Реализованный в нем метод адаптивной обработки принятого сигнала, с целью улучшения ОСШ на выходе приемника, заключается в следующем. Согласно ранее уже представленному методу адаптации [5, 9], все элементы антенной решетки делились на блоки, каждый из которых включал в себя определенное количество элементов антенны. Число элементов в блоках k выбиралось одинаковой величины и зависело от двух параметров: общего числа элементов антенны и количества пространственных трактов.

Однако такой подход затруднителен при большом количестве элементов антенной решетки, так как в этом случае количество элементов в блоке резко увеличивается, а большие блоки влекут большие затраты, возникает необходимость сле-

доть за тем, чтобы ранг корреляционной матрицы был выше или равен числу элементов каждого блока решетки. Поэтому было решено применить адаптивный алгоритм без деления антенной решетки на блоки (рис. 1). А операцию суммирования после весовой обработки производить за счет преобразования параллельных пространственных кодов в последовательные во времени при пространственно-временном (ПВ) декодировании. Кроме конструктивного упрощения системы передачи возросло число элементов антенной решетки, сигналы на выходах которых используются в определении пространственной корреляционной матрицы, что увеличивает ее ранг и при увеличении числа путей распространения сигналов надежнее выдерживается соотношение $k \geq N$, где N – число элементов приемной антенной решетки.

Для определения оптимальных весовых векторов корреляционной матрицы применим подход, основанный на нахождении собственных значений и собственных векторов. Данный метод широко используется в системах пространственно-временной обработки сигналов на выходах антенных решеток при точечных в пространстве источниках отражений и излучений. Сигнал на выходе антенной решетки, в отсутствие внешних помех в канале, представляет собой смесь полезного сигнала и теплового шума. Такой шум, как известно, является широкополосным и оказывает влияние на полезный сигнал. Согласно рассматриваемому подходу оптимальный весовой вектор является собственным вектором, соответствующим самому большому собственному значению корреляционной матрицы \mathbf{R} . Блок-схема алгоритма вычисления оптимального весового вектора приведена в [4, 5]. Представленное в этой статье преобразование сигнала повлияет на матрицу канала, которая в исходном состоянии является полной матрицей, соответствующей общему числу передающих и приемных элементов антенн. Для правильного пространственно-временного декодирования необходима матрица канала, соответствующая эквивалентному числу приемных антенн, поэтому потребуется преобразование исходной матрицы канала к эквивалентной.

В представляемой работе оценка переданных символов на приемном конце системы производится на основе максимального правдоподобия.

Проверка стабильности разработанного адаптивного алгоритма. В работах [4–6, 11] установлено, что разработанный адаптивный алгоритм позволяет значительно повысить эффективность системы связи. При пространственной адаптации вероятность появления ошибки снижается, и пропускная способность увеличивается.

Однако в реальных условиях параметры среды распространения меняются во время адаптации, а также мобильная станция перемещается, изменяются положения отражателей в релейском канале, что ведет к переориентации путей распространения. Поэтому существует множество факторов, воздействующих на стабильность алгоритма пространственно-временной обработки сигналов. Для оценки робастности алгоритмов необходима проверка стабильности разработанного алгоритма к погрешности, например, оценки весовых коэффициентов.

Весовые коэффициенты для фазовой антенной решетки являются комплексными числами, изменяющимися амплитудное и фазовое распределение в раскрыве приемной антенной решетки

$$W_{\text{opt}} = |W|e^{j\alpha},$$

$$\text{где } |W| = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}, \quad \alpha = \arctg\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right).$$

В работе выполнен анализ на показатели системы радиосвязи неточности установки модулей $|W|$ и аргументов α весовых коэффициентов. Предполагается, что $|W|$ и α изменяются случайно по равномерному закону плотности вероятности в пределах $\pm\Delta\%$:

$$new\alpha = \alpha \pm \Delta\%, \quad |W|_{new} = |W| \pm \Delta\%.$$

Тогда весовые коэффициенты используются для анализа помехоустойчивости алгоритма в виде двух наборов:

$$W_{opt_new\alpha} = |W| e^{j.new\alpha} \quad \text{и} \quad W_{opt_new} = |W|_{new} e^{j.\alpha}.$$

Результаты исследования разработанного алгоритма обработки пространственно-временных сигналов представлены на рис. 3 в виде кривых для различных вариантов алгоритма. На этом рисунке использованы следующие обозначения:

- ◆ "Адаптация" и "Без адаптации" – алгоритм обработки сигналов при использовании пространственной адаптации и без нее соответственно;
- ◆ "Адаптация +(5–20) %" – обработка сигналов проводится как и при адаптации, но получаемые весовые векторы блоков меняются случайно по равномерному закону в пределах 5–20 %.

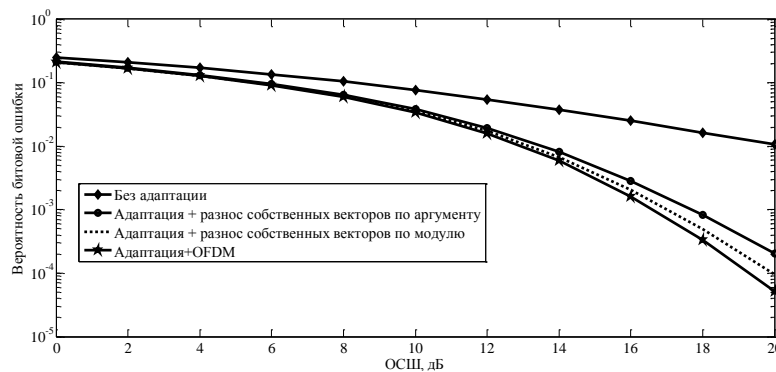


Рис. 3. Вероятность появления битовой ошибки после адаптации и без адаптации при изменении весовых коэффициентов

Выводы. Проведенный анализ показывает, что в адаптивном алгоритме при неточной установке оптимальных весовых векторов, диаграмма направленности блоков ориентирует максимум не точно в направлении прихода полезного сигнала по пути с наибольшей мощностью. При изменении аргументов весовых коэффициентов вероятность появления ошибки принятых символов повышается. Так, при отношении сигнал/шум 16 дБ вероятность ошибки увеличивается примерно в 5 раз. А при изменении модуля весовых коэффициентов вероятность появления ошибки возрастает несколько слабее. Это можно объяснить тем, что в модели используется ФАР (фазированная антенная решетка), поэтому система менее устойчива к разбросу весовых коэффициентов по фазе, а не по амплитуде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Adjoudani et al. Prototype experience for MIMO BLAST over thirdgeneration wireless system // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – April 2003. – Vol. 21, № 3. – P. 440-451.
2. Tarokh V., Seshadri N., and Calderbank A.R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction // IEEE Transactions on Information Theory. – March 1998. – Vol. 44, № 3. – P. 744-756.

3. *Van Zelst*. Space division multiplexing algorithms // in Proc. of the 10th 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; 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; 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; 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; 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-