

Орехов Вячеслав Валентинович – Южный федеральный университет; e-mail: igkd@egf.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371794; кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; ассистент.

Аббасов Ифтихар Балакишевич – кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна; зав. кафедрой; д.т.н.

Orekhov V'yacheslav Valentin – Southern Federal University; e-mail: igkd@egf.tsure.ru; 44, Nekrasovskii, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371794; the department of engineering drawing and computer design; assistant.

Abbasov Iftikhar Balakishi – the department of engineering drawing and computer design; associate professor.

УДК 004.93'12, 004.93'14

В.П. Федосов, А.В. Ломакина

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА МИМО-СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА ДЛЯ ПРИЕМНИКА МОБИЛЬНОЙ СТАНЦИИ

В настоящее время наблюдается все более широкое использование средств беспроводной связи в сетях передачи информации. Одной из главных проблем в бурно развивающейся области беспроводных систем является необходимость повышения пропускной способности и уменьшение вероятности битовой ошибки, т.е. улучшение качества обслуживания пользователей. Большое количество научных работ и статей посвящено их решению. Тем не менее методы по достижению необходимых результатов имеют существенные недостатки. Так, например, пропускная способность может быть увеличена за счет расширения полосы частот или повышения излучаемой мощности, что ведет к дефициту частотного ресурса и к помехам, обусловленным нелинейными искажениями в передатчике. Подобные вопросы особенно остро стоят в мобильных (сотовых) системах связи и в беспроводных компьютерных сетях, работающих в сложных условиях распространения сигналов. В статье приведено исследование адаптивного алгоритма МИМО-системы (Multiply Input - Multiply Output) беспроводного доступа для приемника мобильной станции как метода по улучшению характеристик беспроводной связи (повышению пропускной способности и снижению вероятности битовой ошибки).

МИМО; мобильная станция (МС); базовая станция (БС); адаптация; пропускная способность; вероятность битовой ошибки; антенная решетка (АР).

V.P. Fedosov, A.V. Lomakina

RESEARCH OF ADAPTIVE ALGORITHM FOR MIMO-SYSTEM OF THE WIRELESS ACCESS FOR THE RECEIVER OF THE MOBILE STATION

At present days the growing use of means of wireless communications in information transfer networks is present. One of the main problems of developing wireless systems is necessity to increase the capacity and improve the quality of service for users (reduce the probability of error). A large number of scientific papers and articles devoted to solving them. However, methods to reach the required results have significant disadvantages. For example, the capacity can be improved by expanding the frequency band or increasing the radiated power, which leads to a shortage of frequency resources and interference caused by the nonlinear distortions in the transmitter. This problem is especially relevant in mobile (cellular) communication systems and wireless computer networks working in difficult conditions of signal propagation. The article shows the research adaptive algorithm of MIMO-system (Multiply Input Multiply Output) of wireless access for mobile station receiver as a method to improve the characteristics of wireless communication

(enhance bandwidth and decrease bit error rate). The article shows the study of adaptive algorithm MIMO-system (Multiply Input Multiply Output) wireless access for mobile station receiver as a method to improve the characteristics of wireless communication (increase bandwidth and reduce the bit error rate).

MIMO; mobile station (MS); base station (BS); adaptation; bandwidth; bit error probability; antenna array (AA).

Введение. Одним из самых эффективных способов решений этой проблемы может быть применение адаптивных антенных решёток со слабо коррелированными антенными элементами. Системы связи, которые используют такие антенны, получили название MIMO-систем (Multiple Input Multiple Output – множественный вход – множественный выход). На настоящий момент существующие воплощения MIMO-идеи пока не всегда заметно ускоряют трафик на небольших расстояниях от точки доступа, но на больших удалениях они весьма эффективны. MIMO-принцип позволяет уменьшить число ошибок при радиообмене данными (BER) без снижения скорости передачи в условиях множественных переотражений сигналов [1–4].

При этом многоэлементные антенные устройства обеспечивают:

- 1) расширение зоны покрытия радиосигналами и сглаживание в ней мертвых зон;
- 2) использование нескольких путей распространения сигнала, что повышает вероятность работы по трассам, на которых меньше проблем с замираниями, переотражениями и т.п.;
- 3) увеличение пропускной способности линий связи за счет формирования физически различных каналов (разделенных пространственно, с помощью ортогональных кодов, расстроенных по частоте несущих, различных поляризацій).

Исследование проводилось с целями:

- 1) разработки адаптивного алгоритма пространственно-временных сигналов для приемника мобильной станции, предназначенного для повышения ее эффективности;
- 2) исследования эффективности работы алгоритма по части определения вероятности битовой ошибки и пропускной способности канала связи.

Описание пространственной модели канала MIMO. Для получения статистических данных используется модель пространственного канала SCM, предложенная консорциумом 3GPP (3rd Generation Partnership Project), которая описана в [5–9]. Данная модель используется для описания прохождения сигнала через канал связи при пространственном разнесении. В модели предполагается использование антенных решеток в передатчике и приемнике, формируя таким образом систему MIMO.

Существует большое количество явлений, которые влияют на условия приема сигнала, во время радиосвязи между БС и МС. К ним относятся потери мощности на трассе распространения, теневое ослабление сигнала, быстрое замирание, сдвиг Доплера и т.д. Поэтому существует множество параметров и переменных, которые необходимо рассмотреть при моделировании, для того, чтобы получить достоверные результаты для каждого случая. Подробное описание сред приведено в [5–9].

Пространственная модель канала используется при моделировании на системном уровне. Во время опыта канал подвергается быстрому замиранию в соответствии с движением МС. Информация о состоянии канала передается от МС к БС. Как правило, в серии опытов схемы ячейки и местоположения БС являются фиксированными, а местоположения МС беспорядочно меняются перед началом каждого опыта. Для S элементной антенной решетки БС и U антенной решетки

МС коэффициенты канала для одного из N путей многолучевого распространения (заметим, что эти компоненты не обязательно разрешимы во времени, означая, что разница во времени между последовательными лучами может быть меньше, чем период передачи одной посылки) заданы $S \times U$ матрицей комплексных амплитуд. Обозначим матрицу канала для n -й многопутной компоненты ($n = 1, \dots, N$) как $H_n(t)$. Комплексные амплитуды подвергаются быстрому замиранию, зависящему от движения МС. Полная методика получения матрицы канала состоит из трех основных шагов [10–11]:

1. Определение типа окружающей среды: загородная макро-, городская макро- или городская микросреды.
2. Обновление параметров для симуляции в соответствии с выбранной средой распространения.
3. Генерирование коэффициентов матрицы канала, основанных на заданных параметрах [5–9].

Алгоритм адаптации. Влияние замираний можно существенно снизить, применяя идеи процедуры Грамма–Шмидта. Принцип работы: выбрать из всех путей тот, который обеспечивает максимальную мощность поля в раскрые антенной решетки, а в направлениях остальных путей формировать нули эквивалентной диаграммы направленности антенной решетки. Такие адаптивные алгоритмы обеспечивают снижение вероятности битовой ошибки до 2-х порядков. Однако для этого нужно иметь число элементов блоков антенной решетки не меньше числа путей [5–9].

В результате выполнения всей процедуры адаптивной обработки сигнала в приемнике должен быть сформирован массив, представляющий собой декодированную информационную последовательность битов, переданных через канал связи. В предложенной программе реализуется метод вертикального пространственного мультиплексирования. Рассмотрим основные моменты формирования сигнала на входе приемной антенной решетки. Задается длительность информационной посылки в виде значения количества битов L . Каждый бит информации представляет собой случайное значение, распределенное по равномерному закону и принимающее значения 0 или 1. Затем информационная посылка демультимплексируется в соответствии с количеством элементов антенн в передатчике.

Моделирование прохождения полезного сигнала через релейский канал связи осуществляется путем его умножения на матрицу коэффициентов распространения $H_{S,U}(t)$. Принимаемый сигнал представляется комплексной величиной, реальная и мнимая части которой являются аддитивной смесью полезного сигнала и некоррелированного шума, следующего вида:

$$\begin{aligned} Y_{\text{Re}}(u, i) &= X_{\text{hRe}}(u, i) + N_{\text{Re}}(u, i), \\ Y_{\text{Im}}(u, i) &= X_{\text{hIm}}(u, i) + N_{\text{Im}}(u, i), \quad u = 1 \dots U, \end{aligned}$$

где $N_{\text{Re}}(u, i)$ и $N_{\text{Im}}(u, i)$ – реальная и мнимая части некоррелированного шума приемного тракта. Шумовая составляющая имитирует тепловые и внутренние шумы приемного тракта антенной решетки.

Адаптация производится по критерию максимизации ОСШ. Сначала вычисляется пространственная корреляционная матрица входного сигнала для каждого блока. Затем находятся оптимальные весовые векторы по отношению к вычисленной корреляционной матрице. Для этого вычисляются собственные значения. Оптимальный весовой вектор является собственным вектором, соответствующим самому большому собственному значению корреляционной матрицы. Для адаптации элементы вектора принятого сигнала Y группируются и образуют несколько блоков.

Весовая обработка производится путем перемножения векторов принятого сигнала в блоке и соответствующего оптимального весового вектора. В результате получается значение, соответствующее сигналу на выходе адаптивного устройства.

Выходной сигнал адаптивной решетки можно представить в следующем виде [12]:

$$Y_w(t) = w_{opt}^T Y(t), \quad (1)$$

где $w_{opt} = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ – вектор весовых коэффициентов.

Задача заключается в нахождении вектора W_{opt} . Для этого необходимо вычислить пространственную корреляционную матрицу входного сигнала. Корреляционная матрица вычисляется исходя из следующего выражения:

$$R = E\{Y^*(i) \cdot Y^T(i)\} = \frac{1}{L_Y} \sum_{i=1}^{L_Y} Y^*(i) \cdot Y^T(i), \quad (2)$$

где $L_Y = LS$ – число столбцов массива приемного сигнала Y , а операция $E\{\cdot\}$ обозначает усреднение результатов i произведений векторов Y^* и Y^T .

Для нахождения оптимальных весовых векторов по отношению к вычисленной корреляционной матрице применим подход, основанный на нахождении собственных значений. Данный метод (сингулярного разложения матриц) широко используется для выделения сигналов в системах связи при помощи антенных решеток. Согласно рассматриваемому подходу оптимальный весовой вектор является собственным вектором, соответствующим самому большому собственному значению корреляционной матрицы R . Собственные значения – это мощности сигналов, приходящих в раскрыв приемной антенной решетки по разным путям от передатчика. Переход к матрице собственных чисел означает Эйлеров поворот диаграммы рассеивания системы случайных отсчетов на выходах элементов антенных решеток с целью ориентации ее главных диагоналей относительно системы координат. Матрица собственных векторов – ортогональная и ее детерминант равен единице. Это значит, что при повороте не изменяется детерминант матрицы, равный произведению собственных чисел.

Таким образом, разложение корреляционной матрицы имеет следующий вид:

$$R = V \Lambda V^H,$$

где V – унитарная матрица собственных векторов, а Λ – диагональная матрица соответствующих собственных значений λ_p , $p = 1 \dots k$. После сортировки матрицы собственных значений в порядке возрастания матрицы будут иметь вид

$$V = (V_1, \dots, V_k); \Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_k \end{pmatrix}$$

и при этом

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k.$$

Тогда оптимальный весовой вектор вычисляется следующим образом:

$$W_{opt} = \frac{V_1}{\|V_1\|}, \quad (3)$$

где V_1 – собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению, а операция $\|\dots\|$ обозначает нахождение нормы вектора. Одной из наиболее употребительных норм является следующая:

$$\|\mathbf{V}_1\| = \left(\sum_{i=1}^k |V_{1i}|^2 \right)^{1/2}.$$

В результате поэлементного перемножения этих векторов и суммирования сигнал на выходе антенной решетки, направленной на путь сигнала с наибольшей мощностью.

Адаптация на передающей стороне выполняется аналогичным образом. С помощью сформированных векторов для антенной решетки МС необходимо излучить с нее контрольную посылку на БС. Затем по разработанному алгоритму можно получить весовые векторы для антенной решетки БС. Таким образом, могут быть получены два набора весовых коэффициентов, которые позволяют настроить диаграммы направленности базовой и мобильной станций на путь с максимальной мощностью сигнала в точке приема.

Для правильного пространственно-временного декодирования необходима матрица канала, соответствующая эквивалентному числу приемных антенн, поэтому потребуется преобразование исходной матрицы канала к эквивалентной:

$$\mathbf{H}_{\text{эке}} = \mathbf{H}_{\Sigma} \mathbf{W}.$$

Для оценки переданных символов используется критерий максимального правдоподобия, который определяется следующим векторным произведением:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{H}^{\dagger} \mathbf{Y}_w,$$

где $\hat{\mathbf{X}}$ – оценка переданного вектора сигналов; \mathbf{H}^{\dagger} – псевдообратная матрица канала.

Результатом оценки переданной матрицы символов является несколько параллельных потоков данных, которые необходимо объединить для дальнейшей демодуляции. Эту операцию выполняет мультиплексор.

Для проведения тестирования производится подсчет вероятности ошибочного приема сигнала. ОСШ является переменной величиной и при каждом конкретном значении находится вероятность ошибки. Подсчет количества ошибок ведется для заданного ОСШ, сравнивая переданный и принятый вектор посылок. При этом происходит усреднение по количеству опытов. Таким образом, можно получить зависимости вероятности ошибок на приеме от значения определенного параметра. Исходные данные: количество приемных и передающих элементов, матрица канала в каждый момент времени, вектор излучаемых посылок. Структурная схема алгоритма приведена в [12].

Алгоритм оценки матрицы канала в приемнике. При рассмотрении алгоритма выше полагалось, что матрица коэффициентов канала известна в приемнике. Однако в реальных беспроводных системах связи приемнику необходимо ее периодически оценивать. Оценку канала можно получить методом обучения приемника [13–15].

При медленном изменении характеристик канала, приемник может узнать его состояние, принимая контрольную посылку от передатчика, которая является известной в приемнике. Таким образом, при излучении некоторая часть передающей матрицы \mathbf{X} используется для посылки контрольного пакета, чтобы оценить матрицу \mathbf{H} канала. На практике весь процесс передачи состоит из двух основных фаз: фазы обучения и фазы передачи данных.

Фазу обучения представим в виде следующего векторно-матричного выражения:

$$\mathbf{Y}_i = \sqrt{\frac{\rho_i}{S}} \mathbf{H} \mathbf{X}_i + \mathbf{N},$$

где X_t – комплексная матрица контрольных символов размерностью $T_t \times S$, которые излучаются передатчиком в течение интервала времени T_t ; ρ_t – соотношение сигнал/шум; Y_t – комплексная матрица приемного сигнала размерностью $T_t \times S$; N_t – матрица шума.

Два основных метода, применяющиеся для нахождения матрицы канала, – метод максимального правдоподобия (МП) и метод линейной минимальной среднеквадратической ошибки (МЛСКО). Оценка для каждого из методов соответственно выглядит следующим образом:

$$\hat{H} = \sqrt{\frac{S}{\rho_t}} (X_t^* X_t)^{-1} X_t Y_t$$

и

$$\hat{H} = \sqrt{\frac{S}{\rho_t}} \left(\frac{S}{\rho_t} T_s + X_t^* X_t \right)^{-1} X_t Y_t.$$

Оптимальная обучающая последовательность должна представлять собой матрицу с ортонормированными столбцами. Такой матрицей является единичная матрица. Вторым параметром, который оптимизирует оценку матрицы, является длина обучающей последовательности. Для любого ОСШ на входе приемника установка длительности последовательности, равной $T_t = S$, является оптимальной при оценке матрицы H .

Результаты моделирования. Для оценки эффективности разработанного алгоритма необходимо провести ряд следующих исследований:

1. Определить зависимость вероятности появления ошибочного бита от входного ОСШ при различном числе элементов в каждом из блоков приемной антенны.
2. Оценить среднюю пропускную способность через канал в зависимости от заданного ОСШ для различных случаев обработки сигналов.
3. Для получения правильных зависимостей ошибки от ОСШ необходимо применять усреднение по большому числу реализаций канала, так как большинство параметров модели канала задаются случайным образом и совершенно невозможно предсказать поведение канала от случая к случаю.

Результатом работы программы являются графики вероятности ошибочного приема (битовой ошибки) и пропускной способности канала от отношения сигнал/шум, которые отображаются в соответствующих закладках на лицевой панели. Для вычисления вероятности битовой ошибки в программе производится подсчет битов, принятых неверно, и деление на общее число переданных битов.

Вычисление пропускной способности производится по формуле [11–13]

$$C = \log_2 \det \left(I_{S \times S} + \frac{q}{S} \cdot \hat{H}^H \hat{H} \right),$$

где \det – детерминант; $I_{S \times S}$ – единичная матрица размером $S \times S$, S – число передающих элементов; q – отношение сигнал/шум в раз; \hat{H} – оценка матрицы канала.

На рис. 1, 2 показаны графики зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для исследования разработанного алгоритма адаптации при различных видах модуляции передаваемого сигнала.

Моделирование рассмотренных случаев производилось при 4-х передающих и 4-х приемных элементах АР, шаге передающей АР $d_{0t} = 5\lambda$ и шаге приемной АР $d_{0r} = 0,3\lambda$.

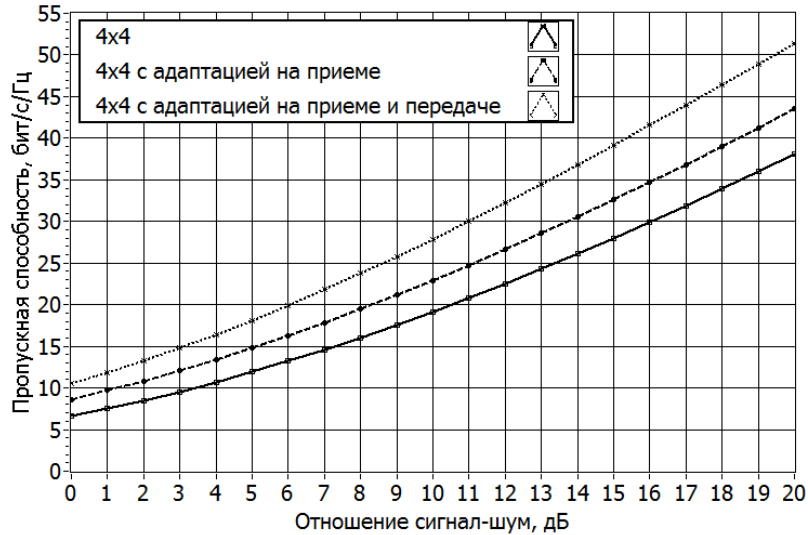


Рис. 1. Пропускная способность системы ошибки от заданного ОСШ

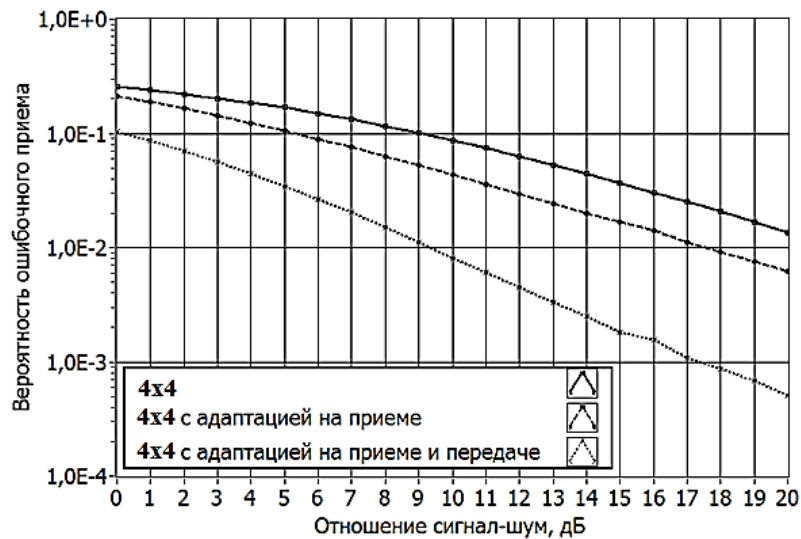


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от заданного ОСШ

Полученные графики не имеют определенной зависимости от шага приемной АР, что объясняется анализом пространственно-временной корреляционной функции [16], которая при определенных параметрах (в данном случае сочетаниях шага передающей и приемной АР) описывает либо область высокой корреляции, либо низкой. Однако в случае разреженной передающей АР (по сравнению с плотной) можно добиться низкой вероятности битовой ошибки, особенно при использовании разреженной АР и на прием.

Выводы. Рассмотренные зависимости доказывают эффективность разработанного алгоритма адаптации – при его применении уменьшается вероятность ошибочного приема и, следовательно, увеличивается пропускная способность канала. Это объясняется направленностью передающей и приемной АР на путь сигнала с наибольшей мощностью, за счет чего уменьшается влияние шумов на этот сигнал. Эффективность алгоритма наблюдается как при большом, так и при меньшем числе антенн. Также повышается пропускная способность канала во всем диапазоне ОСШ, например, при ОСШ, равном 20 дБ, повышение составляет от 1,1 до 1,5 раза в зависимости от числа элементов в АР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Слюсар В.* Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 8. – С. 55-58.
2. Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulation. 3GPP. – Sep. 2003. – Vol. TR 25.996, v6.1.0.
3. Имитация многолучевого канала на основе IEEE 802.11b. (Электронный адрес: <http://habrahabr.ru/post/122544/> 2011).
4. *Xirouchakis I.A.* Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations A Ray Tracing Simulator Based on 3GPP, TR 25.996 v. 6.1.0.
5. *Rusek F., Persson D., Buon Kiong Lau, Larsson E.G., Marzetta T.L., Edfors O. and Tufvesson F.* Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays // IEEE Signal Processing Magazine. – January 2013. – Vol. 30, no. 1. – P. 40-60,
6. *Payami S. and Tufvesson F.* Channel Measurements and Analysis for Very Large Array Systems at 2.6 GHz // 6th European Conference on Antennas and Propagation, Prague, CZ, March 2012.
7. *Федосов В.П., Терновой Д.О.* Алгоритм совместной адаптации на прием и передачу в системе связи на основе антенных решеток // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 56-61.
8. *Федосов В.П., Авилов А.И., Евдокимова Е.О., Муравицкий Н.С., Терновой Д.О., Тьонг Ч.С.* Адаптивные алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов ММО-систем в радиолокации и беспроводных системах связи // Коллективная монография «Цифровая обработка сигналов и её техническое приложение в телекоммуникационных системах» / Под ред. Марчука В.И. – Шахты: ЮРГУЭС, 2010. – С. 96-121.
9. *Ермолаев В.Т., Флакман А.Г.* Современные методы пространственной обработки сигналов в информационных системах с антенными решетками. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы к проблемам генерации, обработки, передачи, хранения, защиты информации и их применение». – Нижний Новгород: НГУ, 2007. – 99 с.
10. *Федосов В.П., Муравицкий Н.С.* Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в ММО-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8. – С. 36-41.
11. *Муравицкий Н.С.* Алгоритм обработки пространственно-временных сигналов в системе связи на основе антенных решеток: Дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2010.
12. *Федосов В.П., Емельяненко А.В.* Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решетки при использовании ММО OFDM в релейском канале // Антенны. – 2013. – № 10.
13. *Djigan.* Algorithmic foundations of the technology V-BLAST for wireless data // First mile. – 2007. – № 1.
14. *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.
15. *Федосов В.П.* Алгоритмы совместной адаптации на прием и передачу в системе связи на основе антенных решеток при наличии активных помех // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 59-64.
16. *Федосов В.П., Емельяненко А.В.* Устойчивость к ошибкам в оценке весовых векторов адаптивного пространственно-временного алгоритма радиосвязи на антенных решетках в релейском канале // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 37-44.

REFERENCES

1. Slyusar V. Sistemy MIMO: printsipy postroeniya i obrabotka signalov [The MIMO systems: principles and signal processing], *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2005, No. 8, pp. 55-58.
2. Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulation. 3GPP, Sep. 2003, Vol. TR 25.996, v6.1.0.
3. Imitatsiya mnogoluchevogo kanala na osnove IEEE 802.11b [Simulation of multipath channel based on the IEEE 802.11 b]. (Available at: <http://habrahabr.ru/post/122544/> 2011).
4. Xirouchakis I.A. Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations A Ray Tracing Simulator Based on 3GPP, TR 25.996 v. 6.1.0.
5. Rusek F., Persson D., Buon Kiong Lau, Larsson E.G., Marzetta T.L., Edfors O. and Tufvesson F. Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays, *IEEE Signal Processing Magazine*, January 2013, Vol. 30, No. 1, pp. 40-60.
6. Payami S. and Tufvesson F. Channel Measurements and Analysis for Very Large Array Systems at 2.6 GHz, *6th European Conference on Antennas and Propagation*, Prague, CZ, March 2012.
7. Fedosov V.P., Ternovoy D.O. Algoritm sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennoy reshetki [The joint adaptation algorithm for reception and transmission in the communication system based on antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2011, No. 9, pp. 56-61.
8. Fedosov V.P., Avilov A.I., Evdokimova E.O., Muravitskiy N.S., Ternovoy D.O., Tyong Ch.S. Adaptivnye algoritmy obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov MIMO-sistem v radiolokatsii i besprovodnykh sistemakh svyazi [Adaptive algorithms for processing spatial-temporal signals MIMO systems in radar and wireless communication systems], *Kollektivnaya monografiya «Tsifrovaya obrabotka signalov i ee tekhnicheskoe prilozhenie v telekommunikatsionnykh sistemakh»* [Collective monograph "Digital signal processing and its technical application in telecommunication systems"]. Shakhty: YuRGUES, 2010, pp. 96-121.
9. Ermolaev V.T., Flaksman A.G. Sovremennyye metody prostranstvennoy obrabotki signalov v informatsionnykh sistemakh s antennoy reshetkoy [Modern methods of spatial signal processing in information systems with antenna arrays], *Uchebno-metodicheskiy material po programme povysheniya kvalifikatsii «Novye podkhody k problemam generatsii, obrabotki, peredachi, khraneniya, zashchity informatsii i ikh primeneniye»* [Educational-methodical material for the training program "New approaches to the problems of generation, processing, transmission, storage, information protection and their application"]. Nizhniy Novgorod: NGU, 2007, 99 p.
10. Fedosov V.P., Muravitskiy N.S. Adaptivnaya priemnaya antennaya reshetka dlya obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov v MIMO-sisteme besprovodnoy peredachi dannykh [Adaptive reception antenna array for processing spatio-temporal signals in MIMO-based wireless data transmission system], *Antenny* [Antenna], 2011, No. 8, pp. 36-41.
11. Muravitskiy N.S. Algoritm obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov v sisteme svyazi na osnove antennoy reshetki: Dis. ... kand. tekhn. nauk [The processing algorithm of the spatial-temporal signals in the communication system based on antenna arrays. Cand. eng. sc. diss.]. Taganrog: TTI YuFU, 2010.
12. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Sravnitel'naya effektivnost' besprovodnogo dostupa na osnove prostranstvennoy adaptatsii na vykhodakh antennoy reshetki pri ispol'zovanii MIMO OFDM v releevskom kanale [Comparative efficiency of wireless access on the basis of spatial adaptation on the outputs of the antenna array when using MIMO OFDM in Rayleigh channel], *Antenny* [Antenna], 2013, No. 10.
13. Djigan. Algorithmic foundations of the technology V-BLAST for wireless data, *First mile*, 2007, No. 1.
14. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V., Gladushenko S.G., Pomortsev P.M. Metody i algoritmy mnogokanal'noy prostranstvennoy obrabotki shirokopolosnykh signalov [Methods and algorithms for multi-channel surround processing broadband signals], *Nelineynyy mir* [Nonlinear world], 2012, No. 11, pp. 731-737.
15. Fedosov V.P. Algoritmy sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennoy reshetki pri nalichii aktivnykh pomekh [Algorithms of cooperative adaptation for reception and transferring in communication system based on arrays in the presence of jamming], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 59-64.

16. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Ustoychivost' k oshibkam v otsenke vesovykh vektorov adaptivnogo prostranstvenno-vremennogo algoritma radiosvyazi na antennykh reshetkakh v releevskom kanale [Stability to errors in the estimation of weight vectors of adaptive existential algorithm of the radio communication on antenna lattices in the relei's channel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 37-44.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: fed_val@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371632, 89525601246; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Ломакина (Емельяненко) Анна Владимировна – e-mail: avemelyanenko@sfedu.ru; тел.: 88634371632, 89515050232; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – South Federal University; e-mail: fed_val@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632, +79525601246; the department of fundamentals of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Lomakina (Emelyanenko) Anna Vladimirovna – e-mail: avemelyanenko@sfedu.ru; phone: +78634371632, +79515050232; the department of fundamentals of radio engineering; postgraduate student.

УДК 621.396.96

Д.С. Дерачиц, Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ-МОДУЛЯ ПРИ СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Рассмотрены вопросы стабильности характеристик фазовращателя на примере четырех опытных образцов микрополосковых фазовращателей, выполненных по схеме последовательного соединения T-модулей. В качестве управляющего элемента использован варикап ВВ-135. Проведены сравнения амплитудно- и фазочастотных характеристик S-параметров, коэффициента стоячей волны исследуемых образцов. Измерения проводились с использованием анализатора цепей PXIe-5632. Анализ характеристик для всех четырех опытных образцов фазовращателя показал высокую степень повторяемости результатов исследования для серии образцов макета. Обработка результатов экспериментальных исследований выполнена в программе FEKO. Разброс обратных потерь образцов при исследовании не превысил 0,4 дБ, фазовая характеристика обратных потерь с графической точностью совпала при всех вариациях управляющего напряжения на варикапе. Экспериментальные характеристики имеют некоторые осцилляции, связанные с паразитными связями, возникшими в процессе монтажа, а также из-за наличия собственных паразитных емкостей сосредоточенных элементов (варикапов), однако уровень осцилляций невелик и не ухудшает характеристики фазовращателя.

Фазовращатель; микрополосковое устройство; варактор; S-параметры; FEKO.

D.S. Derachits, N.N. Kisel, S.G. Grishchenko

INVESTIGATION OF STABILITY PERFORMANCE MICROWAVE MODULES IN SERIES PRODUCTION

Stability characteristics questions of the phase shifter in Four prototypes microstrip phase shifters performed on the serial communication circuit T-modules are discussed. Varactors BB-135 is used as the control. Comparison of the frequency characteristics of the S-parameters, VSRW for the test samples are made. The measurements were performed using a network analyzer