

УДК 621.391

В.И. Слюсар<sup>1</sup>, Н.А. Масесов<sup>2</sup><sup>1</sup>Центральный НИИ вооружения и военной техники ВС Украины, Киев<sup>2</sup>Военный институт телекоммуникаций и информатизации НТУУ "КПИ", Полтава

## ТЕХНОЛОГИЯ МУЛЬТИ-МІМО В ГАРАНТОСПОСОБНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

В статье рассмотрены преимущества использования техники многопользовательской сети с технологией множественного входа множественного выхода (мульти-МІМО) в современных беспроводных системах гарантоспособной связи. Предложены аналитические модели мульти-МІМО для систем связи различной конфигурации. Обоснованы различные подходы к реализации пространственно-временного кодирования сигналов для повышения пропускной способности и помехозащищенности каналов связи. Предложен вариант формализации физического уровня модели многопользовательской сети МІМО, который позволяет оценить ее предельные возможности по точности демодуляции сигнала в зависимости от количества одновременно работающих абонентских терминалов.

**Ключевые слова:** множественный вход – множественный выход, пространственно-временное кодирование сигналов, дополнительное стробирование отсчетов аналого-цифрового преобразователя, метод неортогональной частотной дискретной модуляции (N-OFDM), многопользовательская сеть.

### Введение

Беспроводные системы связи находят сегодня все большее применение в различных отраслях деятельности человека. Успехи современной радиоэлектроники, стремительное развитие микропроцессорной техники и новые алгоритмы цифровой обработки сигналов, вместе с использованием перспективных телекоммуникационных технологий открывают новые возможности по созданию беспроводных систем связи с выполнением жестких требований по высокой пропускной способности и помехозащищенности. Не удивительно, что в таких условиях находит свое применение технология МІМО (Multiple Input Multiple Output – множественный вход – множественный выход), которая позволяет максимально использовать выделенный для работы частотный ресурс и передавать информацию по пространственно разнесенным каналам [1]. Современные достижения процессорной техники и развитие элементной базы, в том числе отечественных производителей [2], делают возможным использование технологии МІМО как в маломощных переносных устройствах, так и в станциях радио, радиорелейной, космической и тропосферной связи. Особо стоит выделить направление развития беспроводных локальных вычислительных сетей на основе стандарта 802.11 n, где МІМО является неотъемлемой базой обеспечения высокой пропускной способности для работы современных мультимедийных приложений.

Преимущество технологии МІМО заключается в возможности устойчивого функционирования каналов связи в условиях многолучевого распространения радиоволн. Это позволяет использовать МІМО как в небольших офисных сетях зданий и городских застроек, так и в тропосферных системах связи с их характерными особенностями.

В статье рассматриваются принципы построения и режимы работы системы мульти-МІМО, компактные матричные выражения откликов указанной системы, необходимые для формализации работы ее модели, а также направления дальнейших научных исследований.

### Основная часть

Система с тремя и более абонентами, в которой организуется связь с использованием технологии МІМО, называется мульти-МІМО системой (Multi User МІМО) [3]. В режиме поочередного излучения абонентами сигналов при их обработке в приемных сегментах мульти-МІМО каналов связи можно использовать обычные методы декодирования, поскольку многопользовательская система фактически вырождается в набор однопользовательских. При одновременном выходе в эфир нескольких абонентов следует применять известные схемы кодирования, но более высокой степени иерархии либо новые алгоритмы обработки, основанные на проверке гипотез о количестве одновременно излучающих многоантенных передатчиков.

Для рассмотрения модели описания мульти-МІМО системы связи необходимо ввести ограничения и обозначения. Уточним, что рассматривается такая система МІМО, в которой осуществляется обработка сигналов нескольких разнесенных в пространстве МІМО систем. Основным условием при этом является стационарность среды распространения радиоволн на интервале времени с момента измерения передаточных характеристик каналов МІМО до завершения передачи по ним информационных блоков. Запишем матричные выражения отклика приемной цифровой антенной решетки (ЦАР) простейшей МІМО-станции с двумя антенными элементами при обработке OFDM или N-OFDM

сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (QAM), излученных одновременно парой абонентских терминалов.

Существенно, что абонентские устройства также имеют в своем составе передающие ЦАР из двух антенных элементов. Введем следующие обозначения:  $u_{i,j}$  – напряжения по выходу  $i$ -го приемного канала в  $j$ -й момент времени;  $h_{kpm,j}$  – передаточная характеристика канала МИМО между  $p$ -й антенной  $k$ -го абонента и  $m$ -й приемной антенной в  $j$ -й момент времени;  $A_{kp}$  – сигнал, который излучается  $p$ -й антенной  $k$ -го абонента;  $n_{i,j}$  – напряжение шума на выходе  $i$ -го приемного канала в  $j$ -й момент времени (все индексные переменные ( $k, p, m, i, j$ ) могут принимать значения 1 или 2). Тогда система уравнений, описывающая отклик приемной цифровой антенной решетки, будет иметь вид:

$$\begin{cases} u_{1,i} = h_{111,i}A_{12} + h_{121,i}A_{11} + h_{211,i}A_{22} + \\ \quad + h_{221,i}A_{21} + n_{1,i}; \\ u_{1,i+1} = h_{111,i+1}A_{11} + h_{121,i+1}A_{12} + h_{211,i+1}A_{21} + \\ \quad + h_{221,i+1}A_{22} + n_{1,i+1}; \\ u_{2,i} = h_{112,i}A_{12} + h_{122,i}A_{11} + h_{212,i}A_{22} + \\ \quad + h_{222,i}A_{21} + n_{2,i}; \\ u_{2,i+1} = h_{112,i+1}A_{11} + h_{122,i+1}A_{12} + h_{212,i+1}A_{21} + \\ \quad + h_{222,i+1}A_{22} + n_{2,i+1}. \end{cases} \quad (1)$$

Строки этой системы соответствуют напряжениям по выходам двух приемных каналов цифровой антенной решетки в паре последовательных отсчетов времени, что обеспечивает возможность решения системы уравнений, в которой искомым является вектор комплексных амплитуд  $A$  с четырьмя неизвестными:  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{21}$  и  $A_{22}$ . Запишем систему (1) в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} u_{1,i} \\ u_{1,i+1} \\ u_{2,i} \\ u_{2,i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{111,i} & h_{121,i} & h_{211,i} & h_{221,i} \\ h_{111,i+1} & h_{121,i+1} & h_{211,i+1} & h_{221,i+1} \\ h_{112,i} & h_{122,i} & h_{212,i} & h_{222,i} \\ h_{112,i+1} & h_{122,i+1} & h_{212,i+1} & h_{222,i+1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{21} \\ A_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1,i} \\ n_{1,i+1} \\ n_{2,i} \\ n_{2,i+1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

или компактно

$$U = H \cdot A + N. \quad (3)$$

В выражении (2) строки матрицы  $H$  соответствуют временным отсчетам, а блоки – номеру абонента.

Например, в первой строке матрицы  $H$  в левом блоке стоят передаточные характеристики первой и второй антенн первого абонента для первого приемного канала цифровой антенной решетки в первом временном отсчете.

Аналогичным образом могут быть получены аналитические модели мульти-МИМО системы более сложной структуры.

Приведенная матричная запись является довольно общей, и для описания различных алгоритмов кодирования в ней необходимо конкретизировать элементы матрицы  $H$ .

Например, для кодирования по методу "магического квадрата" с поочередным излучением одинаковых сигналов разными передающими элементами по схеме  $2 \times 2$  [1] матрица  $H$  будет иметь структуру:

$$H = \begin{bmatrix} h_{121,i} & h_{111,i} & h_{221,i} & h_{211,i} \\ h_{111,i+1} & h_{121,i+1} & h_{211,i+1} & h_{221,i+1} \\ h_{122,i} & h_{112,i} & h_{222,i} & h_{212,i} \\ h_{112,i+1} & h_{122,i+1} & h_{212,i+1} & h_{222,i+1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В этом случае схема распределения передаваемых сигналов свелась, фактически, к поочередному излучению через две антенны каждого передатчика.

В случае ориентации на кодирование Аламоути возможно подвергнуть модификации вектор амплитуд сигналов, положив в нем:

$$A_{21} = A_{11}^*;$$

$$A_{22} = -A_{12}^*.$$

Таким образом, вектор  $A$  будет иметь элементы

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{11}^* \\ -A_{12}^* \end{bmatrix}, \quad (5)$$

а матрица  $H$  останется в виде, представленном в системе (2).

Однако в ряде случаев, например, при анализе предельных возможностей пространственного уплотнения каналов связи, целесообразно вектор амплитуд оставлять неизменным, а адаптации подвергать элементы матрицы  $H$ . При этом для указанного варианта кодирования по схеме Аламоути следует записать:

$$H = \begin{bmatrix} h_{121,i} & h_{111,i} & h_{221,i} & h_{211,i} \\ h_{111,i+1}^* & -h_{121,i+1}^* & h_{211,i+1}^* & -h_{221,i+1}^* \\ h_{122,i} & h_{112,i} & h_{222,i} & h_{212,i} \\ h_{112,i+1}^* & -h_{122,i+1}^* & h_{212,i+1}^* & -h_{222,i+1}^* \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Если приемная антенна имеет 4 канала, то в таком варианте рассмотренной системы мульти-ММО возможно осуществлять оценивание четырехкомпонентного вектора комплексных амплитуд сигналов за один отсчет времени. В результате можно пренебречь временным измерением системы (2), переписав ее в виде:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{111} & h_{121} & h_{211} & h_{221} \\ h_{112} & h_{122} & h_{212} & h_{222} \\ h_{113} & h_{123} & h_{213} & h_{223} \\ h_{114} & h_{124} & h_{214} & h_{224} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{21} \\ A_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Следует отметить, что для одноотсчетных измерений на приемном сегменте количество антенных элементов должно быть равно количеству одновременно излучающих в эфир передающих каналов. Для повышения канальной емкости мульти-ММО системы целесообразно использовать плоские приемные ЦАР в сочетании с временным, частотным и поляризационным разделением сигналов.

Допущением является также применение помехоустойчивых кодов, которое обеспечивает снижение требований к точности демодуляции сигналов.

Необходимо отметить, что основным достоинством представленного подхода к пространственно-временной обработке сигналов в мульти-ММО системе является обобщение формул обработки сигналов на выходах приемных каналов, что обеспечивает инвариантность используемого метода демодуляции к выбранному алгоритму кодирования.

Предложенный вариант формализации физического уровня модели многопользовательской сети ММО позволяет оценить ее предельные возможности по точности демодуляции сигналов в зависимости от количества одновременно работающих абонентских терминалов.

С этой целью следует воспользоваться нижней границей Крамера-Рао для расчета потенциальных точностей оценивания амплитуд сигналов, записав информационную матрицу Фишера в виде квадратичной матричной формы  $I = H^* \cdot H$ , где \* – символ комплексно сопряженного транспонирования, а блочные матрицы  $H$  соответствуют выражению (3). Обращение информационной матрицы Фишера позволяет получить дисперсии оценок амплитуд сигналов, домножив диагональные элементы обратной матрицы на дисперсию шума по выходу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) либо процедуры дополнительного стробирования отсчетов АЦП. Последняя позволит согласовать работу высокоскоростного АЦП на выходе приемного канала ЦАР с цифровыми устройствами в схеме дальнейшей обработки сигнала [4]. Рассчитанные указанным способом оценки дисперсий далее следует сравнить с

величиной межсимвольного интервала кодирования, задаваясь требуемой вероятностью безошибочной демодуляции.

## Заключение

Таким образом, в статье предложена компактная матричная запись отклика описанной системы мульти-ММО. Представленный способ формализации модели позволяет свести формальный вид обработки сигналов к методам, которые уже используются в случае оценки сигнальных параметров в однопользовательской системе ММО.

Приведенные материалы говорят о перспективности использования техники мульти-ММО в беспроводных системах связи, в том числе радиорелейных и тропосферных сетях специального назначения. Что касается сети тропосферной связи специального назначения, то она должна строиться с использованием мульти-ММО систем и обеспечивать возможности программной реконфигурации оборудования, радиодоступа и одновременной работы в радиорелейном режиме.

Дальнейшие исследования планируется направить на интеграцию методов квадратурной обработки сигналов в приемнике, дополнительного стробирования отсчетов аналого-цифрового преобразователя, формирование вторичных пространственных каналов приемной цифровой антенной решетки и передачи N-OFDM (OFDM) сигналов с предложенной моделью системы. Планируется также сделать оценку зависимости пропускной способности мульти-ММО системы с использованием предлагаемых методов.

Отдельным направлением последующих исследований следует выделить разработку модели объединенной сети отдельных мобильных станций в беспроводной системе связи. В такой объединенной системе мульти-ММО при передаче информации от двух подвижных станций к базовой станции пользователи "кооперируются". То есть пользователь 1 часть времени тратит на передачу собственной информации, а часть – на передачу информации, которую он получает от пользователя 2. Аналогичную стратегию использует и пользователь 2. Таким образом, создается сеть станций, увеличивается пропускная способность системы и уменьшается вероятность срыва связи в ней, что особенно критично при построении систем связи специального назначения.

## Список литературы

1. Слюсар В.И. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2005. – № 10. – С. 52-59.
2. Слюсар І.І., Масесов М.О., Дубик А.М., Волошко С.В. Реалізація перспективних телекомунікаційних технологій та методів цифрової обробки сигналів на вітчизняній елементній базі // *Системи обробки інформації.* – 2007. – № 9 (67). – С. 87-91.

3. Gershman A. An array processing approach to MIMO communications // Proc. International Conference on Antenna Theory and Techniques, 17-21 September, 2007, Sevastopol, Ukraine.

X.: ХИРЭ, 1996. - № 5. - С. 55-62.

Поступила в редколлегию 1.03.2008

4. Слюсар В.И. Синтез алгоритмов измерения дальности M-источников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП // Радиоэлектроника (Изв. вузов). –

**Рецензент:** канд. техн. наук, доцент В.В. Варич, Военный институт телекоммуникаций и информатизации НТУУ "КПИ", Полтава.

## ТЕХНОЛОГІЯ МУЛЬТИ-МІМО В ГАРАНТОСПОСОБНИХ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

В.І. Слюсар, М.О. Масєсов

У статті розглянуті переваги використання техніки багатокористувальницької мережі з технологією множинного входу множинного виходу (мульти-МІМО) в сучасних бездротових системах гарантоздатного зв'язку. Запропоновані аналітичні моделі мульти-МІМО для систем зв'язку різної конфігурації. Обґрунтовані різні підходи до реалізації просторово-часового кодування сигналів для підвищення пропускної спроможності та завадозахищеності каналів зв'язку. Запропоновано варіант формалізації фізичного рівня моделі багатокористувальницької мережі МІМО, який дозволяє оцінити її граничні можливості по точності демодуляції сигналів залежно від кількості одночасно працюючих абонентських терміналів.

**Ключові слова:** множинний вхід – множинний вихід, просторово-часове кодування сигналів, додаткове стробування відліків аналого-цифрового перетворювача, метод неортогональної частотної дискретної модуляції, багато користувальницька мережа.

## TECHNOLOGY OF MUL'TI-MIMO IN GARANTOSPOSOBNYKH WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS

V.I. Slyusar, N.A. Masesov

In the article advantages of the use of technique of multiuser network are considered with technology of plural entrance of plural output (multi-MIMO) in modern wireless dependability communication networks. The analytical models of multi-MIMO are offered for communication of different configuration networks. Different approaches of realisation of existential space-time coding of signals for increase of throughput and noise immunity of communication channels are proved. The variant of formalization of physical level of model of multiuser network of MIMO is offered, which allows to estimate its maximum possibilities on exactness of demodulation of signals depending on the amount of simultaneously workings terminals of subscribers.

**Keywords:** a plural entrance is a plural output, spatio-temporal encoding of signals, additional gating of counting out of analog-digital transformer, method of nonorthogonal frequency discrete modulation, multiuser network.