

АЛГОРИТМ ВЫБОРА СХЕМЫ МИМО-СИСТЕМЫ В РАДИОЛИНИЯХ С НЕСКОЛЬКИМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ КАНАЛАМИ

Якушенко Сергей Алексеевич,
Санкт-Петербургский Государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия,
was16@mail.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-24-36

Manuscript received 21 January 2025;
Accepted 25 February 2025

Дворников Сергей Викторович,
Санкт-Петербургский Государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия,
practicdsv@yandex.ru

Ключевые слова: радиолинии, многоантенные системы, предельная пропускная способность, оптимального распределение антенных элементов

В работе рассматриваются радиолинии беспроводной связи с многоантенными системами. Целью исследований является анализ и оценка пропускной способности мно-гоантенных радиолиний различных схем в сложной сигнально-помеховой обстановке и построение оптимальной мобильной системы связи на основе радиолиний с МИМО технологиями. В работе проведена оценка пропускной способности радиолиний с различными схемами по технологии МИМО-систем в гауссовском и релейском каналах. Установлено, что пропускная способность радиолиний зависит от многих факторов - вариантов схем радиолинии, количества антенн, способов приема и обработки сигналов, а также от дальности связи, т.е. где находится абонент- вблизи базовой станции или на краю зоны обслуживания, а также от условий ведения связи - в крупном или малонаселенном городе, в сильно пересеченной местности или равнинной и т.п. Достичь заданную пропускную способность радиолинии возможно различными способами - применяя ту или иную схему технологии МИМО, увеличивая степень мультиплексирования или количество антенн для разнесенного приема. Так, например, технология мультиплексирования в МИМО-системах эффективна при больших значениях отношения сигнал-помеха, а технология разнесенного приема (SIMO) достаточно эффективна при малых значениях. Поэтому возникает целесообразность в комбинировании вариантов схем МИМО-систем и технологий приема сигналов, таким образом, чтобы достичь наилучшей эффективности радиолинии, в смысле пропускной способности и помехоустойчивости при минимальных затратах элементов антенной системы. Перспективные базовые станции будут иметь сотни антенных элементов, которые распределяться по абонентским радиолиниям в зависимости от потребности в пропускной способности и качестве связи. Однако, как показала оценка схем построения МИМО-систем достичь заданных значений показателей можно различными способами комбинации антенн, их количества, приема и обработки сигналов в субканалах радиолинии. Таким образом, при

множестве абонентов в зоне обслуживания, находящихся в разных условиях связи, возникает задача оптимального распределения антенного ресурса по абонентским радиолиниям для достижения максимальной пропускной способности системы связи в целом. В работе предложен подход к распределению антенного ресурса базовой станции в зоне ее обслуживания и метод синтеза оптимальной структуры сети мобильной связи с большим количеством абонентов (оптимального распределению антенного ресурса по радиолиниям сети). В качестве показателя эффективности системы связи с многоантенными радиолиниями выбрана пропускную способность как свойство, связанное с предназначением системы и помехоустойчивость сигналов к суммарным помехам как свойство качества связи, а также затраты на их реализацию. Результаты исследований могут использоваться для разработки алгоритмов максимизации пропускной способности в зоне обслуживания базовой станции мобильной связи в сложных условиях электромагнитной обстановки, динамики изменения информационной нагрузки в радиолиниях и перемещения абонентских терминалов в разнообразной топологии местности и городской застройки. Многоантенные системы должны рационально сочетать алгоритмы борьбы с замираниями и повышения пропускной способности линий, что может решать предложенный алгоритм. Поэтому дальнейшими исследованиями является оптимальное распределение антенных ресурсов базовых станций с учетом имеющегося ресурса абонентских станций по критерию производительности и устойчивости линий к замираниям сигналов, т.е. разрешения компромисса между пропускной способностью и устойчивостью радиолинии с учетом внешних деструктивных воздействий на радиолинии мобильной связи. Кроме того, возможна и обратная задача - формирование требований к ресурсам базовой и абонентской станций для достижения требуемых целевых показателей системы мобильной связи в заданной зоне обслуживания.

Информация об авторах:

Якушенко Сергей Алексеевич, профессор кафедры Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербург, Россия

Дворников Сергей Викторович, профессор кафедры, Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Якушенко С.А., Дворников С.В. Алгоритм выбора схемы мимо-системы в радиолиниях с несколькими пространственными каналами // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №3. С. 24-36.

For citation:

S.A. Yakushenko, S.V. Dvornikov, "Algorithm for selecting the mimo system scheme in radio links with multiple spatial channels," T-Comm, 2025, vol. 19, no.3, pp. 24-36. (in Russian)

Введение

В настоящее время бурное развитие в системах беспроводной связи получили инфокоммуникационные технологии, направленные на повышение пропускной способности радиолиний и их устойчивости к замираниям сигналов в многолучевом канале [1-4]. Повышение скорости передачи информации в радиолиниях за счет увеличения ее энергетичности, расширения полосы частот канала или увеличения спектральной плотности достигли апогея [5-8]. Поэтому, актуальным является подход формирования пространственно-разнесенных каналов с ограниченной полосой пропускания, использующих одни и те же частоты.

Пространственное разнесение каналов радиолинии достигается применением многоантенных систем (МАС). Данный вопрос, достаточно хорошо проработан, в частности в [9-12]. В работах [13-15] рассматривалась зависимость предельной скорости передачи информации в МIMO-системах в условиях влияния интерференционных замираний. В некоторых работах проводились исследования, связанные с оценкой пропускной способности радиолиний в зависимости от параметров МАС и степени корреляции между сигналами в параллельных каналах [16, 17].

Однако, применительно к радиолиниям беспроводной связи, возникает вопрос оценки предельной пропускной способности от совокупности параметров многолучевого канала: энергетических параметров [18, 19]; глубины замираний радиосигнала [20]; количества каналов с пространственных разнесение в сочетании с разнесенным приемом при различных вариантах комбинирования схем МIMO-систем [21, 22].

Кроме того, возникает задача оценки эффективности применения антенных элементов, как в радиолиниях, так и в МАС радиостанций, организующих множественную связь с абонентами [23, 24].

Таким образом, можно заключить, что направление исследования являются актуальным и требует детального анализа и оценки эффективности применения технологий МАС в радиолиниях мобильной связи. Этим вопросам и посвящена данная статья.

Модели формирования и обработки сигналов в радиолиниях МАС

Технология МАС в зависимости от способа формирования и обработки сигналов позволяет повысить пиковую скорость передачи данных. Данная технология получила название МIMO (Multiple Input Multiple Output) [25].

Радиолинии с этой технологией обеспечивает передачу одного или несколько входных потоков данных при помощи нескольких антенн, расположенных на передающей и на приемной сторонах (симметричные системы передачи информации).

В соответствии с рисунком 1 один или несколько входных потоков данных преобразуются в N параллельных пространственных потоков, где N – количество передающих антенн.

Излучаемые пространственные потоки принимаются M приемными антеннами.

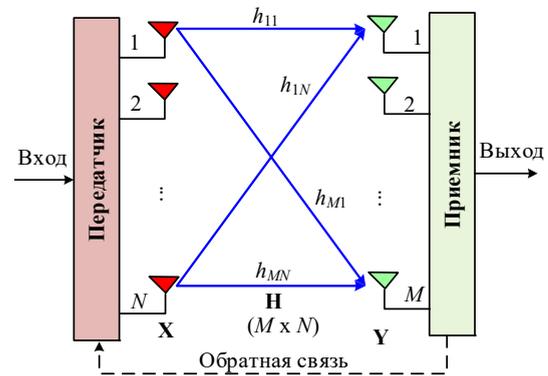


Рис. 1. Общая схема технологии МАС с технологией симметричной передачи информации

Свойства МIMO-канала, соединяющего передающий элемент с приемным элементом, описываются комплексными канальными коэффициентами h_{ij} , образующими канальную матрицу \mathbf{H} размера $N \times M$. Их значения случайно изменяются со временем из-за наличия многолучевого распространения сигнала. Математически симметричную систему передачи информации (СПИ), т.е. собственно МIMO-систему можно представить выражением [13, 26, 27].

$$Y = \mathbf{H} \cdot X + N_0 \tag{1}$$

или

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N h_{1i} x_i + \sum_{i=1}^N n_{1i} \\ \sum_{i=1}^N h_{2i} x_i + \sum_{i=1}^N n_{2i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N h_{Mi} x_i + \sum_{i=1}^N n_{Mi} \end{bmatrix},$$

где Y – вектор наблюдения на входе приемника размерностью $M \times 1$; X – вектор сигнала на выходе передатчика размерностью $N \times 1$; \mathbf{H} – матрица комплексного коэффициента передачи радиолинии размерностью $M \times N$; N_0 – вектор адаптивных шумов (собственных шумов) размерностью $M \times 1$.

На приемной стороне для оптимального выделения сигналов используется оценочная обратная матрица, комплексно сопряженная с матрицей комплексных коэффициентов передачи в среде распространения радиоволн $\hat{\mathbf{H}}^{-1}$ (эрмитово сопряженная матрица) [28]. Ее можно определить путем периодически поочередной передачи опорных сигналов. Тогда, измерив на приемной стороне значения коэффициентов передачи логических каналов радиолинии h_{ij} можно найти обратную матрицу. Так, например, при использовании конфигурации радиолинии 2×2 (две передающие антенны и две приемные антенны) обратную матрицу $\hat{\mathbf{H}}^{-1}$ можно определить на основе метода алгебраических дополнений [13, 27]

$$\hat{\mathbf{H}}^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{12} \\ \hat{h}_{21} & \hat{h}_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det(\hat{\mathbf{H}})} \begin{bmatrix} (-1)^{1+1} \hat{h}_{22} & (-1)^{1+2} \hat{h}_{12} \\ (-1)^{2+1} \hat{h}_{21} & (-1)^{2+2} \hat{h}_{11} \end{bmatrix} = \tag{2}$$

$$= \frac{1}{\hat{h}_{11} \hat{h}_{22} - \hat{h}_{12} \hat{h}_{21}} \begin{bmatrix} \hat{h}_{22} & -\hat{h}_{12} \\ -\hat{h}_{21} & \hat{h}_{11} \end{bmatrix},$$

где $\hat{\mathbf{H}}$ – оценочная матрица комплексных коэффициентов передачи линии связи, полученные на приемной стороне; $\det(\hat{\mathbf{H}}) = \hat{h}_{11}\hat{h}_{22} - \hat{h}_{12}\hat{h}_{21}$ – определитель матрицы $\hat{\mathbf{H}}$.

Пренебрегая шумами линии связи, допустив равенство $N = M$ (условие существования обратной матрицы) и учитывая, что $\mathbf{I}\mathbf{Z} = \mathbf{Z}$, где \mathbf{I} – ортогональная единичная матрица размером $N \times N$, выражение (1) можно записать как

$$\mathbf{X} = \hat{\mathbf{H}}^{-1} \cdot \mathbf{Y}. \quad (3)$$

или

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(\hat{\mathbf{H}})} \begin{bmatrix} \hat{h}_{22} & -\hat{h}_{12} \\ -\hat{h}_{21} & \hat{h}_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(\hat{\mathbf{H}})} \begin{bmatrix} \hat{h}_{22}y_1 - \hat{h}_{12}y_2 \\ -\hat{h}_{21}y_1 + \hat{h}_{11}y_2 \end{bmatrix},$$

Таким образом в простейшем случае для выделения на приемной стороне вектор передаваемого сигнала из наблюдения, необходимо знать матрицу комплексных коэффициентов передачи линии связи матрицы \mathbf{H} .

Кроме симметричной СПИ существуют несимметричные (рис. 2) [14, 15], которые имеют множество антенн только на одной стороне: передающей (технология MISO); приемной (технология SIMO).

Математически линию связи SIMO можно представить выражением

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{X} + \mathbf{N}_0 \quad (4)$$

или

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_M \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1x + n_1 \\ h_2x + n_2 \\ \vdots \\ h_Mx + n_M \end{bmatrix},$$

где \mathbf{Y} – вектор наблюдения на входе приемника, $M \times 1$; \mathbf{s} – вектор сигнала на выходе передатчика; \mathbf{H} – вектор комплексных коэффициентов передачи линии связи h_i , размерностью $N \times 1$.

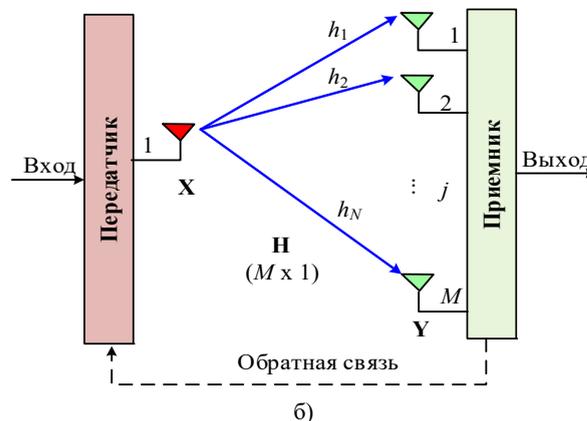
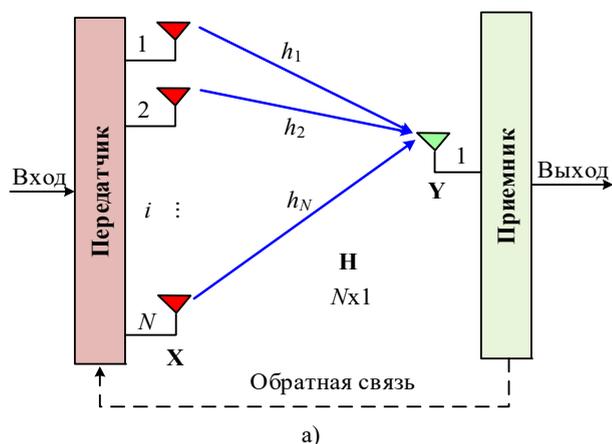


Рис. 2. Общая схема технологии MAC с несимметричной передачей информации: а) пространственно-разнесенная передача MISO; б) пространственно-разнесенный прием SIMO

Несимметричные схемы пространственного разнесения предназначены для повышения устойчивости радиолинии к интерференционным замираниям в многолучевом канале, которая обеспечивается посредством передачи нескольких копий одного сигнала по пространственно-разнесенным путям.

Организационно, MIMO-системы могут иметь или не иметь обратную связь [9, 27]:

1. MIMO с «открытой петлей» (без обратной связи). В данном случае оценки канала на приемном конце используются для коррекции искажений, вносимых каналом.

2. MIMO с «замкнутой петлей» (с обратной связью). Здесь, помимо оценки канала, на приеме и компенсации помех, производится передача этих оценок на передающую сторону по обратному каналу с целью формирования оптимальной передачи сигналов.

Кроме того, в сетях беспроводной связи реализуются как однопользовательские SU-MIMO (Single User MIMO), так и многопользовательские MU-MIMO (Multi User MIMO). При SU-MIMO «вниз» разные потоки данных, передаваемые базовой станцией (БС) в одном частотном канале, принимает одна абонентская станция (АС), а в направлении «вверх» одна АС также может передавать через разные антенны несколько независимых потоков.

При MU-MIMO «вниз» разные потоки будут направлены разным АС, причем каждая АС получает только один поток.

Радиолинии MU-MIMO «вверх» в одном частотном канале одновременно передают несколько потоков.

На рисунке 3 показана структура SU-MIMO и MU-MIMO вниз с четырьмя АС. В настоящее время в сетях подвижной связи только за счет пространственного мультиплексирования обеспечивается «вниз» (БС-АС) до восьми потоков, а «вверх» (АС-БС) до четырех абонентов для SU-MIMO и до восьми абонентов для MU-MIMO. В стандарте 5G эти возможности значительно расширились.

На практике используются следующие схемы MIMO: пространственное мультиплексирование (Spatial Multiplexing – SM) [14]; пространственно-временное кодирование (Space-Time Coding – STC) [29]; метод формирования диаграммы направленности (ДН) (Beamforming) [30].

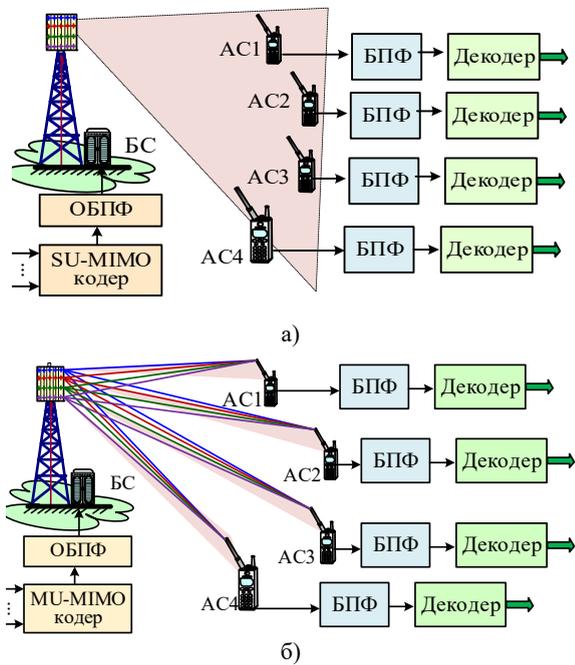


Рис. 3. Однопользовательские и многопользовательские системы MIMO:

- а) однопользовательская система SU-MIMO;
- б) многопользовательская система MU-MIMO

В случае использования схемы пространственного мультиплексирования исходный поток данных распределяется (мультиплексируется) между каналами передачи, число которых равно числу передающих антенн. При этом *различные данные* передаются соответствующими антеннами, которые работают *на одной частоте, т.е. избыточность не вводится*.

Таким образом при пространственном мультиплексировании создается несколько каналов с независимыми потоками, что *позволяет повысить* общую скорость передачи данных.

Вариант STC используется для повышения пропускной способности радиолинии [29]. Упрощенная схема, поясняющая алгоритм функционирования радиолинии при передаче данных двумя антеннами, приведена на рисунке 4.

Последовательный входной поток информационных сигналов демультиплексируется на N параллельных подпотоков. Каждый подпоток кодируется специальным пространственно-временным кодом и после модуляции излучается в пространство соответствующей антенной. Следует отметить, что все N параллельных подпотоков излучаются одновременно в одной и той же полосе частот.

В случае пространственно-временного кодирования, например, в схеме Аламоути, два ортогональных символа одновременно излучаются в два временных слота в отличии от SM [31]. Схема проста в реализации и позволяет *снизить* вероятность ошибок, тем не менее, спектральная эффективность схемы недостаточно велика

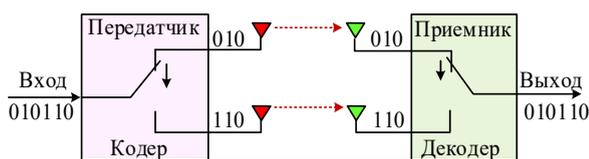


Рис. 4. Упрощенная схема алгоритма STC

Метод управление лучом и формирование ДН обеспечивает *узконаправленную* передачу с большим антенным усилением при точном позиционировании *основного лепестка* относительно *приемной антенны* устройства, что повышает качество связи. При этом изменять форму и направление луча в режиме реального времени возможно только при наличии *обратной связи* в канале.

Схемы STC и SM применяются в тех ситуациях, когда *параметры* MIMO-канала точно не известны, в *противном* случае применяется метод формирования ДН, в котором передача информации осуществляется в едином потоке.

Преимуществом данного метода является *возможность* значительно *повысить* спектральную эффективность и *снизить* вероятность ошибки на бит по сравнению с системами SISO, однако необходимость точного знания параметров MIMO-канала значительно ограничивает область его применения.

Наибольший интерес представляют новые, наименее изученные, варианты схем MIMO, реализующие методы пространственной модуляции (*Spatial Modulation – SM*) [32] и селекцию передающих антенн (*Transmit Antenna Selection – TAS*) [33], упрощенные схемы которых приведены на рисунке 5. Они применяются в сетях пятого поколения в городских условиях [34].

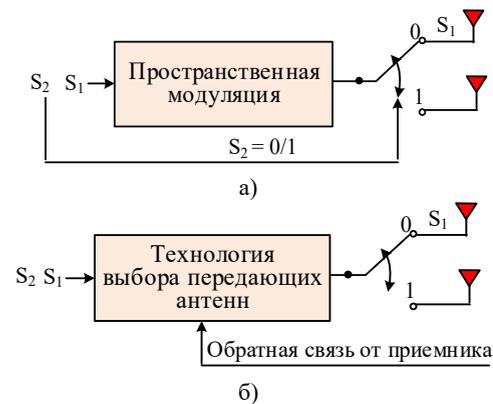


Рис. 5. Упрощенные схемы новых методов MIMO: а) пространственная модуляция; б) селекция передающих антенн (это наше)

При *пространственной модуляции*: бит 1 – излучает активная антенна, бит 0 – другая антенна не излучает, т.е. передача последовательного потока из единиц и нулей переключает антенны.

В этом режиме сигнальные биты не передаются физически, а информация содержится в индексе антенны (пространственном созвездии). Она дополняет плоское сигнальное созвездие комплексного сигнала пространственной координатой активных излучателей (индексов антенн), что создает трехмерную пространственную диаграмму [28].

Метод селекции передающих антенн обеспечивает выбор излучателя информационных сигналов на основе параметров канала, качество которого определяется приемной антенной решеткой и по обратному каналу передается передатчику для выбора активной антенны. Этот метод аналогичен схеме разнесенного приема (SIMO) [27], радиолиния которой включает одну передающую антенну и много приемных. Отличием является то, что обработка сигнала в приемнике проводится не

по одной искаженной копии (селективная), а по нескольким (групповая), что уменьшает вероятность ошибки.

Таким образом, существует множество схем ММО-систем, каждая из которых решает определенные задачи, связанные с повышением помехоустойчивости, увеличением пропускной способности радиолинии и уменьшением влияния многолучевости распространения радиоволн на устойчивость радиолинии. Общим элементом моделей различных схем является наличие матрицы комплексных коэффициентов передачи канала, которая содержит информацию не только о передаточных свойствах среды, но и о варианте схемы ММО-системы, ее назначении и возможностях.

Наиболее важным свойством радиолинии отражающую ее эффективность является **пропускная способность** [35], как основное свойство назначения радиолинии. Поэтому далее рассмотрим способы оценки пропускной способности радиолиний с многоантенными системами с пространственно-разделенными каналами и определим их предельные возможности с различными вариантами построения схем ММО-систем.

Пропускная способность радиолиний с МАС при АБГШ

В качестве показателя эффективности радиолинии с МАС выберем ее пропускную способность как свойство, связанное с предназначением радиолинии [18]. Рассмотрим оценку пропускной способности радиолиний с МАС в гауссовском канале связи. Это однолучевый радиоканал без замираний или с медленными замираниями сигнала, передаточная функция которого описывается нормальным законом распределения (функцией Гаусса).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x-a}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

где a – математическое ожидание (среднее значение) распределения случайной величины x – среднеквадратическое отклонение случайной величины x от среднего значения a ; σ – дисперсия распределения случайной величины.

Гауссовый канал обладает свойствами непрерывности полезного сигнала и шумов, занимает ограниченную полосу частот шириной F_k , в которой спектр мощности шума равномерен и равен N_0 единиц мощности на единицу полосы частот (аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ)), а средняя мощность полезного сигнала $x(t)$ фиксирована и равна P_c . Причем сигнал и шум статистически независимы. Мгновенные значения амплитуд шума $n(t)$ распределены нормально в полосе частот канала. Принимаемый сигнал $y(t)$ есть сумма полезного сигнала и шума: $y(t)=x(t)+n(t)$, т.е. шум аддитивен по отношению к полезному сигналу.

Такая модель канала позволяет анализировать искажение сигналов и влияния флуктуационной помехи. Кроме того, вышеизложенные свойства канала позволяют вычислить пропускную способность гауссова канала. Так, ограниченность полосы частот позволяет применить теорему отсчетов, а аддитивность шума и его независимость от сигнала позволяют представить пропускную способность канала моделью Шеннона-Хартли, которая определяет верхнюю границу безошибочной максимальной скорости передачи информации (пропускную способность) по непрерывному (аналоговому)

классическому (SISO) каналу связи, выраженную в единицах – (бит/с)/Гц

$$C = \Delta F \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right), \quad (6)$$

где ΔF – полоса пропускания канала связи; P_c – полная средняя мощность сигнала в полоса пропускания канала связи; $P_{ш}$ – полная средняя мощность гауссовского шума полоса пропускания канала связи; $P_c/P_{ш}$ – отношение мощности сигнала к мощности шума (ОСШ) на выходе канала связи (на входе приемника)

Представленная модель позволяет определить переданное количество информационных бит в единицу времени в заданной полосе частот **одного** канала связи при определенном энергетическом соотношении сигнала и помехи в канале (ОСШ) без учета достоверности приема полезного сигнала.

Эту модель можно расширить и применить к радиоканалам многоантенных систем (ММО-систем). Физический смысл выражения (1) поясняет предельно возможную скорость передачи для классической радиолинии (канала) SISO (Single Input Single Output), где имеется одна передающая и одна приемная антенны ($N = M = 1$) [36].

В общем виде формулу ёмкости **многопоточковой** системы ММО при **не равномерном распределении мощности** между всеми пространственными каналами можно описать следующим выражением вида

$$C = \Delta F \sum_{m=1}^{K_n} \log_2 \left[\left(1 + \text{ОСШ}_m \lambda_{K_n} \right) \right], \quad (7)$$

где K_n – количество параллельных разнесенных в пространстве потоков данных с одинаковой полосой пропускания частот ΔF , которое удовлетворяют условию максимального мультиплексирования $K_n = \min\{M, N\}$; N – количество передающих антенн; M – количество приемных антенн; λ_{K_n} – собственное значение матрицы комплексных коэффициентов передачи субканалов в среде распространения радиоволн радиолинии; ОСШ_m – отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума на выходе m -го субканала радиолинии.

Из выражения (7), следует, что **пропускная способность канала ММО** равна количеству **пропускных способностей каналов SISO**, поэтому канал ММО представляется, как совокупность каналов SISO, которые работают параллельно. С увеличением числа параллельных каналов (антенн) скорость передачи данных в радиолиниях с технологией ММО увеличивается, не расширяя ширину полосы пропускания собственно канала связи.

Однако вычисление пропускной способности в каждом субканале является сложным процессом в виду многих неопределенностей. Поэтому упростим выражение (7) используя ограничения на энергетику сигналов и канал связи (**равномерное распределение мощности** между всеми пространственными каналами), а также учитывая выражения (2) и (3), получим

$$C = \Delta F \sum_{m=1}^{K_n} \log_2 \left[\left(1 + \frac{\text{ОСШ}}{K_n} \lambda_{K_n} \right) \right] = \Delta F \log_2 \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\text{ОСШ}}{K_n} \mathbf{H}\mathbf{H}^{-1} \right) \quad (8)$$

где \mathbf{H} , \mathbf{H}^{-1} – прямая и обратная канальные матрицы комплексного коэффициента передачи радиолинии в среде распространения радиоволн размерностью $M \times N$, которые определяются выражениями (2) и (3); \det – определитель матрицы, записанный в скобках; \mathbf{I} – единичная $N \times M$ матрица.

Сингулярные и собственные показатели связаны с формулой $P = \sigma^2 = \lambda_i$. Последняя формула позволяет вычислять пропускную способность без вычисления собственных значений передаточных матриц.

Величина $\lambda_{\text{кп}}$ равна коэффициенту передачи h_{ij} по мощности соответствующего пространственного канала. Для простоты анализа необходимо нормализовать канальную матрицу в соответствии с выражением

$$\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |h_{ij}|^2 \right) / NM = 1, \quad (9)$$

Тогда, если считать, что условия распространения радиоволн в каждом субканале (разнесенных в пространстве каналах) одинаковые и ортогональны, а также коэффициенты передачи субканалов нормированы, то формула (8) для детерминированной радиолинии при воздействии АБГШ примет вид

$$C = K_{\text{п}} \Delta F_{\text{к}} \log_2 \left(1 + \frac{\text{ОСШ}}{K_{\text{п}}} \right), \quad (10)$$

Таким образом, формула (10) позволяет определить предельную пропускную способность радиолинии с технологией ММО без вычисления собственных значений канальной матрицы.

Для несимметричных ММО-систем (MISO и SIMO) в соответствии с формулой Шеннона-Хартли повысить пропускную способность радиолинии можно только за счет увеличения ее энергетики. Для этих схем радиолиний, с учетом принятых выше ограничений, предельное значение пропускной способности, равно:

$$C_{\text{miso}} = \Delta F_{\text{к}} \log_2 \left(1 + N \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} \right);$$

$$C_{\text{simo}} = \Delta F_{\text{к}} \log_2 \left(1 + M \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}}} \right). \quad (11)$$

При комплексном использовании в ММО-системе мультиплексирования и разнесенного приема на приемной стороне в каждой параллельной ветви на основе формул (10) и (11) модель определения пропускной способности примет вид

$$C = K_{\text{п}} \Delta F_{\text{к}} \log_2 \left(1 + M \frac{\text{ОСШ}}{K_{\text{п}}} \right), \quad (12)$$

Таким образом, в работе ведено ряд ограничений на определение пропускной способности в ММО-системах, которые не будут сказываться на проявляемые тенденции выбора схемы ММО-системы. Данный подход справедлив только для сравнительного анализа различных способов формирования структуры ММО-системы.

Снижение пропускной способности в выбранных схемах ММО будет идентичным, т.к. модель учитывает внешние факторы системы и не связана с внутренними дестабилизирующими воздействиями субканалов, которые будут проявляться одинаково (среда распространения волн не меняется в зависимости от применяемой схемы).

Оценка пропускной способности радиолиний с МАС

На рисунке 6 показаны графики зависимостей пиковой скорости передачи информации в полосе частот $F_{\text{к}} = 1$ Гц от отношения сигнал/шум (АБГШ) и количества антенн при использовании технологии SISO ($N = M = 1$), а также при различных режимах SIMO (SIMO 1x2; SIMO 1x3 и SIMO 1x4) и ММО (ММО 2x2: $N = M = 2$; ММО 3x3: $N = M = 3$; ММО 4x4: $N = M = 4$ (сплошная линия) и схем разнесенного приема в каждом субканале каждой схемы соответственно с $M = 1, M = 3, M = 4$ (пунктирные линии).

На рисунке 7 приведены графики зависимости пиковой скорости передачи информации комбинированных схем ММО с различным количеством параллельных каналов от количества приемных антенн разнесенного приема в каждом субканале для малых (0 дБ), средних 10 дБ и 20 дБ) и больших (40 дБ) значений ОСШ на входе приемника.

Из рисунков следует, что при малых отношениях сигнал/шум (до 5 дБ), что соответствует, как правило, предельной дальности связи:

- пропускная способность собственно ММО-систем растет нелинейно и составляет от 10 до 35% относительно SISO;
- пропускная способность с учетом разнесенного приема (количества каналов M) позволяет дополнительно ее повысить от 40 до 60 % относительно SISO.

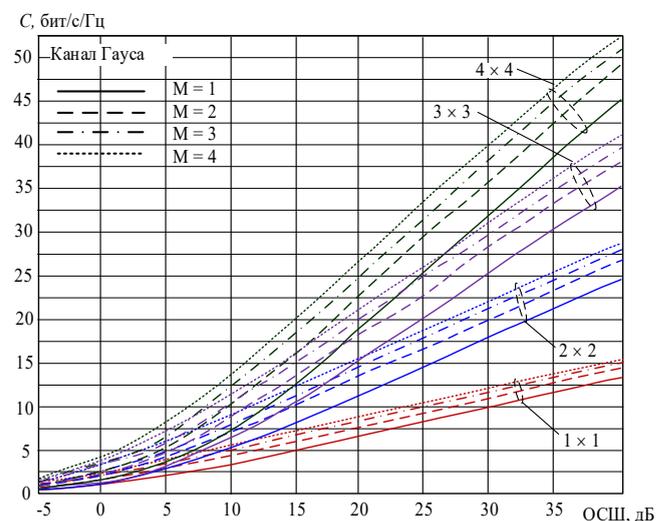


Рис. 6. Зависимость пиковой скорости передачи информации в гауссовом канале связи с технологией ММО и разнесенного приеме от ОСШ в гауссовом канале связи

При больших отношениях сигнал/шум (30...40 дБ), что соответствует малой дальности связи, например, вблизи базовой станции:

- пропускная способность собственно ММО-систем растет линейно многократно от 2 до 3,5 раз относительно SISO;

– пропускная способность с учетом разнесенного приема (количества каналов M) позволяет дополнительно ее повысить от 5 до 30% относительно SISO.

Анализ графиков зависимости пропускной способности от количества каналов разнесения M в различных схемах MIMO показывает, что они имеют различный угол ее нарастания. Наибольшая крутизна скатов графиков наблюдается при малых значениях ОСШ, а наименьшая при больших значениях ОСШ.

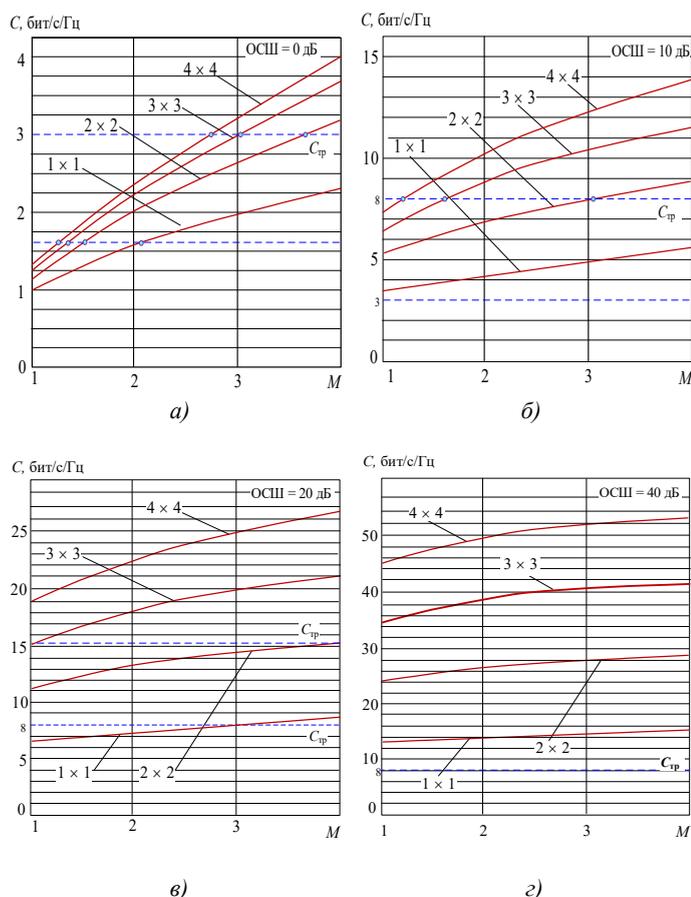


Рис. 7. Зависимость пиковой скорости передачи информации в различных схемах MIMO-систем от количества антенн в разнесенном приеме при различных значениях ОСШ: а) 0 дБ; б) 10 дБ; в) 20 дБ; г) 40 дБ

Поэтому достижение требуемой пропускной способности $C_{\text{тр}}$ за счет комбинирования количества антенн будет целесообразным при больших дальностях связи и нецелесообразным вблизи базовой станции.

Кроме того, достичь требуемое значение $C_{\text{тр}}$ можно и за счет смены схемы MIMO с простой на более сложную, т.е. путем увеличения параллельных каналов. Однако, в этом случае возникает дилемма о эффективности применения той или иной схемы MIMO-системы.

Таким образом, технология мультиплексирования в MIMO-системах эффективна при больших значениях ОСШ, а технология разнесенного приема (SISO) достаточно эффективна при малых значениях. Она обеспечивает близкие к MIMO скорости передачи данных.

Пропускная способность радиолиний с MАС при интерференционных замираниях

Недостатками радиолиний с MАС являются большие размеры антенных систем, стоимость и аппаратные ограничения (повышенная техническая сложность) системы. К тому же, по мере увеличения количества антенн фактическая производительность MIMO все больше отстает от теоретического прироста. К преимуществам, можно отнести способность MIMO экономично **улучшать пропускную способность, расширять пограничную** соттовую сеть, **покрытие и групповую мобильность** беспроводной сети за счет использования распределенных антенн.

Технология комбинирования (комплексного использования) схем MIMO-систем во многих практических применениях, например, в многолучевых каналах беспроводной связи, перевешивает недостатки, за счет использования преимущества макродифференцирования (наращивания параллельных каналов в пространственных координатах) в дополнение к **микродифференцированию** (наращивание субканалов разнесенного приема внутри схемы). Данная технология может эффективно использовать пространственную область мобильных каналов с замираниями сигналов для значительного повышения производительности систем в многолучевых беспроводных радиолиниях.

Основная идея комбинированной MIMO заключается в группировании субканалов в виртуальную антенную решетку для обеспечения связи по протоколу MIMO. Тогда **совместная передача** в различных схемах MIMO включает в себя систему из **нескольких двухточечных радиоканалов**, включая каналы **внутри** виртуального массива и, возможно, каналы между различными виртуальными массивами.

Таким образом, дальнейшие обобщения оценки пропускной способности радиолиний с MАС **связаны** с рассмотрением "небелых" сигналов и шумов и с допущением случайности их величин в случае замираний радиосигналов.

Основной проблемой, не позволяющей в полной мере реализовать преимущества MIMO-систем, является наличие в сети связи интерференционных (соканальных) помех, создаваемых в радиолиниях, работающим на тех же частотах в соседних секторах или сотах (каналах). Решения возникающих при этом задач имеются в литературе по теории информации [13].

Простая оценка пропускной способности в многолучевом канале возможна если считать, что АБГШ и интерференционные помехи независимы. Тогда потенциальную скорость передачи информации в многолучевом канале можно оценить с использованием той же, но модифицированной формулы

$$C_{\text{mimo+q}} = K_n \Delta F_k \log_2 \left\{ 1 + \frac{M}{K_n} \left(\frac{1}{P_c/P_{\text{ш}}} + \frac{1}{P_c/P_n} \right)^{-1} \right\}, \quad (13)$$

где $P_c/P_n = q^2$ – отношение средних мощностей сигнала/интерференционной помехи.

Формула (13) позволяет определить пропускную способность в радиолиниях с комбинированием схем MIMO в условиях многолучевости канала. Реально в каждом субканале существуют индивидуальные условия распространения радиоволн.

Очевидно, что интерференционные помехи будут снижать предельную скорость передачи информации информации. Поэтому для сравнения пропускной способности гауссовского и многолучевого каналов целесообразно ввести относительное снижение скорости передачи информации вследствие влияния интерференционной помехи. Количественной оценкой данного показателя является отношение реальной пропускной способности к максимальной. Тогда относительное снижение скорости передачи информации вследствие влияния интерференционной помехи можно оценить следующим образом:

$$\Delta C = \frac{C_{\text{mimo}} - C_{\text{mimo}+q}}{C_{\text{mimo}}}, \quad (14)$$

где C_{mimo} – пропускная способность в гауссовском канале для схем ММО-систем; $C_{\text{mimo}+q}$ – пропускная способность в многолучевом канале с величиной интерференционных замираний q , рассчитанная для одинаковых схем ММО-систем (C_{mimo}).

Оценка пропускной способности радиолиний с МАС при интерференционных замираниях

На рисунке 8 приведены графики зависимостей пиковой скорости передачи информации от отношения сигнал/шум в полосе частот $F_k = 1$ Гц при различных уровнях интерференционных помех и схем ММО-систем, аналогичных графикам рисунка 6. Из рисунка следует, что интерференционные помехи снижают скорость передачи информации.

На рисунке 9 приведены графики зависимости пиковой скорости передачи информации от количества приемных антенн разнесенного приема в каждом субканале при различных уровнях интерференционных помех и схем ММО-систем, аналогичных графикам рисунка 7.

Анализ графиков на рисунках 8 и 9 позволяет определить снижение скорости передачи информации вследствие влияния интерференционной помехи:

1. Пиковая пропускная способность в многолучевом канале с технологией SISO и разнесенным приемом **снижается** по сравнению с гауссовским каналом за счет влияния интерференционных помех:

- в условиях глубоких замираний ($q=0$ дБ) в дальней зоне (ОСШ=0 дБ) 1,72 раза, в средней зоне (ОСШ=10 дБ) в 3,72 раза и в ближней зоне (ОСШ=40 дБ) в 13,3 раза, а с учетом разнесенного приема ($M = 4$) – в 1,47, 2,43 и 6,6 раз соответственно, т.е. разнесенный прием улучшает производительность многолучевого канала;

- в условиях средних замираний ($q=10$ дБ) в дальней зоне 1,03 раза, в средней зоне в 1,34 раза и в ближней зоне в 3,84 раза, а с учетом разнесенного приема ($M = 4$) – в 1,05, 1,22 и 2,85 раз соответственно, т.е. разнесенный прием улучшает производительность многолучевого канала, но в меньшей степени, чем в условиях глубоких замираний радиосигнала;

- в условиях незначительных замираний ($q=40$ дБ) в дальней и средней зонах соизмерима, а в ближней зоне в 1,08 раза, с учетом разнесенного приема ($M = 4$) – в 1,07 раза, что значительно меньше, чем при глубоких и средних замираниях.

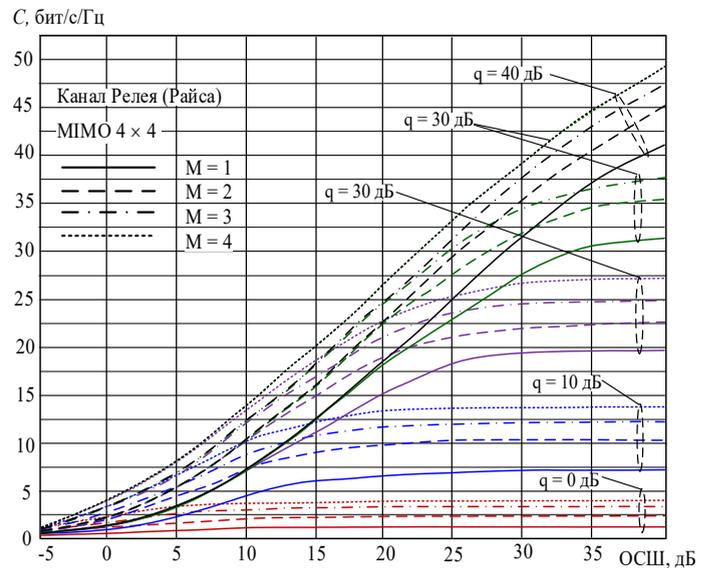


Рис. 8. Зависимость пиковой скорости передачи информации от отношения сигнал/шум в многолучевом канале связи с технологией ММО с учетом разнесенного приема и глубины интерференционных замираний

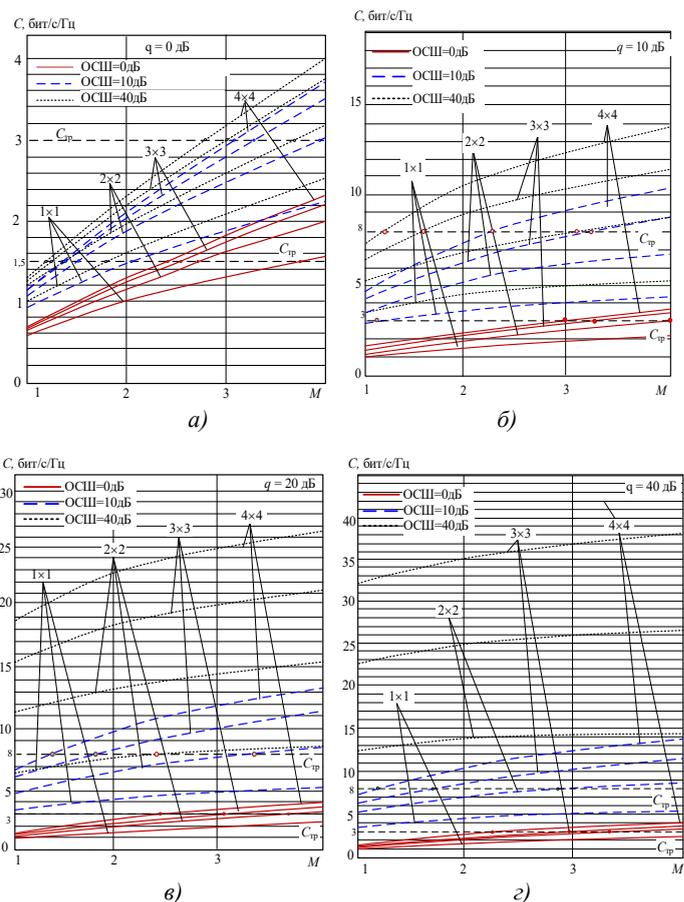


Рис. 9. Зависимость пиковой скорости передачи информации в различных схемах ММО-систем от количества антенн разнесенного приема в многолучевом канале связи б) при $q=20$ дБ – средних значениях замираний (райсовских); в) при $q=40$ дБ – незначительных замираниях радиосигнала в точке приема

2. Пиковая пропускная способность в многолучевом канале с технологией MIMO 4x4 с разнесенным приемом **снижается** по сравнению с гауссовским каналом за счет влияния интерференционных помех:

– в условиях глубоких замираний ($q=0$ дБ) в дальней зоне 1,91 раза, в средней зоне в 6,13 раза и в дальней зоне в 34,8 раза, а с учетом разнесенного приема ($M=4$) – в 1,71, 3,7 и 13,3 раза соответственно, т.е. разнесенный прием улучшает производительность многолучевого канала;

– в условиях средних замираний ($q=10$ дБ) в дальней зоне 1,1 раза, в средней зоне в 1,55 раза и в ближней зоне в 6,25 раза, а с учетом разнесенного приема ($M=4$) – в 1,07, 1,33 и 3,85 раз соответственно, т.е. разнесенный прием улучшает производительность многолучевого канала, но в меньшей степени, чем в условиях глубоких замираний радиосигнала;

– в условиях незначительных замираний ($q=40$ дБ) в дальней и средней зонах соизмеримы, а в ближней зоне в 1,09 раза, с учетом разнесенного приема ($M=4$) – в 1,08 раза, что значительно меньше, чем при глубоких и средних замираниях.

Таким образом, разнесенный прием дает максимальное приращение пропускной способности радиолинии в условиях глубоких замираний и относительно больших ОСШ на входе приемника. Комбинация разнесенного приема и мультиплексирования субканалов в пространстве дает большее увеличение пропускной способности комплексирования по сравнению с классической радиолинией (SISO) (табл. 1).

Таблица 1

Относительное снижение скорости передачи информации за счет влияния интерференционных помех в радиолинии с технологией SISO $\Delta C = (C - C_q)/C$

$q, \text{ дБ}$	Разнесе- ние	ОСШ, дБ									
		-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	M=1	0,22	0,42	0,60	0,73	0,81	0,85	0,88	0,90	0,91	0,92
	M=2	0,20	0,37	0,54	0,66	0,74	0,79	0,83	0,86	0,87	0,89
	M=3	0,19	0,34	0,49	0,62	0,70	0,76	0,80	0,83	0,85	0,87
	M=4	0,18	0,32	0,47	0,59	0,67	0,73	0,78	0,81	0,83	0,85
10	M=1	0,027	0,067	0,14	0,25	0,38	0,50	0,59	0,65	0,70	0,74
	M=2	0,024	0,057	0,117	0,21	0,33	0,44	0,53	0,60	0,65	0,69
	M=3	0,023	0,051	0,104	0,19	0,31	0,41	0,50	0,57	0,63	0,67
	M=4	0,021	0,047	0,096	0,180	0,289	0,396	0,484	0,554	0,61	0,65
40	M=1	0,000 0	0,000 1	0,000 2	0,000 4	0,000 9	0,002 1	0,005 4	0,014	0,034	0,075
	M=2	0,000 0	0,000 1	0,000 1	0,000 3	0,000 7	0,001 9	0,004 8	0,013	0,031	0,070
	M=3	0,000 0	0,000 1	0,000 1	0,000 3	0,000 7	0,001 7	0,004 5	0,011 9	0,030 0	0,067 2
	M=4	0,000 0	0,000 0	0,000 1	0,000 3	0,000 6	0,001 7	0,004 4	0,011 5	0,029 1	0,065 4

Относительное снижение скорости передачи информации в различных схемах MIMO вследствие влияния интерференционной помехи, вычисленное по формуле (13) приведено в таблице 2 и на рис. 10, 11.

Таблица 2

Относительное снижение скорости передачи информации за счет влияния интерференционных помех в радиолинии с технологией MIMO (4x4)

$q, \text{ дБ}$	Разнесе- ние	ОСШ, дБ									
		-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	M=1	0,23	0,47	0,70	0,84	0,90	0,93	0,95	0,96	0,97	0,97
	M=2	0,23	0,45	0,66	0,79	0,86	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95
	M=3	0,22	0,43	0,63	0,76	0,83	0,87	0,90	0,92	0,93	0,94
	M=4	0,22	0,42	0,60	0,73	0,81	0,85	0,88	0,90	0,91	0,92
10	M=1	0,023	0,082	0,193	0,35	0,51	0,64	0,72	0,77	0,81	0,84
	M=2	0,029	0,08	0,17	0,30	0,44	0,564	0,65	0,71	0,76	0,79
	M=3	0,028	0,07	0,15	0,27	0,41	0,53	0,61	0,68	0,73	0,76
	M=4	0,027	0,067	0,14	0,25	0,383	0,50	0,59	0,654	0,70	0,74
40	M=1	0,0000	0,0001	0,0002	0,0006	0,0013	0,0029	0,007	0,017	0,041	0,089
	M=2	0,0000	0,0001	0,0002	0,0005	0,0011	0,0025	0,006	0,015	0,037	0,081
	M=3	0,0000	0,0001	0,0002	0,0004	0,0009	0,0023	0,0057	0,0144	0,0353	0,078
	M=4	0,0000	0,0001	0,0002	0,0004	0,0009	0,0021	0,0054	0,0138	0,034	0,075

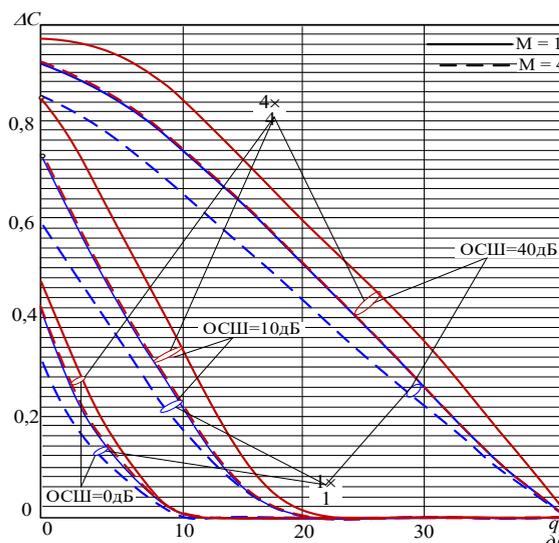


Рис. 10. Относительное снижение пропускной способности радиолиний со схемами MIMO от уровня интерференционной помехи

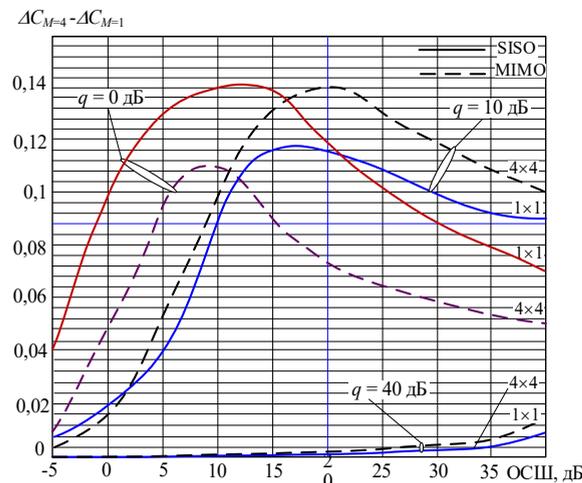


Рис. 11. Относительное снижение пропускной способности от ОСШ при различном уровне интерференционной помехи в радиолиниях MIMO

Анализ полученных результатов комбинации схем ММО-систем позволяет заключить, что вследствие воздействия интерференционных помех происходит значительное снижение пропускной способности радиолинии по сравнению с АБГШ. Причем максимальное снижение наблюдается в релейских каналах связи, т.е. при глубоких ($q = 0$ дБ) уровнях замираний сигналов на входе приемника

Разнесенный прием эффективен в определенной области значений ОСШ, т.е. имеет оптимальные (максимальные) значения приращения пропускной способности:

1. В диапазоне значений ОСШ от 5 дБ до 15 дБ (рис. 11) при глубоких (релеевских) уровнях замирания радиосигнала, причем схема SISO на 5-10% эффективней схемы ММО.

2. В диапазоне значений ОСШ от 15 дБ до 25 дБ (рис. 11) при средних (райсовских) уровнях замираний радиосигнала, причем схема ММО на 2-3% эффективней схемы SISO.

3. В диапазоне больших значений ОСШ (30-40 дБ) схемы разнесенного приема незначительно влияют на пропускную способность.

Следовательно, в дальней зоне связи при **глубоких замираниях** целесообразно использовать классические схемы радиосвязи 1×1 с разнесенным приемом, при **средних** – комбинированные схемы ММО-систем, а при незначительных уровнях замираний разнесенный прием использовать нецелесообразно, а технологию мультиплексирования субканалов целесообразно применять для наращивания пропускной способности.

Таким образом, предложенная технология комплексного использования схем ММО-систем позволяет реализовывать рациональный выбор схемы мультиплексирования и разнесенного приема (количества антенных элементов и их группирование) в радиолиниях с многоантенными системами адаптации. Такая адаптация позволит высвободить ресурс антенных элементов базовой (абонентской) станции, например, для мониторинга, организации новых направлений связи, решения навигационных и других задач.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены ММО-системы радиосвязи, использующие в системах мобильной связи 4-го и 5-го поколения. Установлено, что на потенциальную пропускную способность влияют интерференционные помехи присущие мобильным системам связи, особенно в городских условиях и пространственная корреляция. Поэтому МАС должны рационально сочетать алгоритмы борьбы с замираниями и повышения пропускной способности линий. Данную дилемму можно решать путем комбинирования структур схем ММО-систем сочетая мультиплексирование и разнесенный прием. В этом случае возникает задача оптимального распределения антенного ресурса по критериям производительности и устойчивости линий к замираниям радиосигналов, т.е. разрешения компромисса между пропускной способностью и устойчивостью радиолинии с учетом частотно-временной и пространственной корреляции между сигналами.

Литература

1. Khan R. Hybrid-NOMA for Wireless Communication System // Proceedings of Telecommunication Universities. 2023. Vol. 9, No. 3, pp. 104-111. DOI 10.31854/1813-324X-2023-9-3-104-111. EDN HCXCNS

2. Singh M., Singh M.L., Singh R. Statistical channel modeling of intensity fluctuations in the turbulent underwater wireless optical communication system // Opticheskiy Zhurnal. 2022. Vol. 89, No. 12, pp. 19-37. DOI 10.17586/1023-5086-2022-89-12-19-37. EDN ASUBWK

3. Seleznev V.M. A high-gain steerable reflective array antenna for V-band wireless communications // Radioengineering. 2022. Vol. 86, No. 3, pp. 122-123. DOI 10.18127/j00338486-202203-11. EDN HGFOVL

4. Якушенко С.А., Дворников С.В., Крячко А.Ф. и др. Методика оценки устойчивости сети многоканальной радиосвязи на основе решения задачи Коши для системы матричных уравнений Колмогорова, описывающих ее состояние // Радиотехника. 2020. Т. 84, № 12(24). С. 112-120. DOI 10.18127/j00338486-202012(24)-11. EDN NNOXZC

5. Дворников С.В., Жеглов К.Д., Дворников С.С. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 11. С. 15-20. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20. EDN YLWCFH

6. Баскакова А.В., Кузнецов С.Н., Широбакин С.Е. Конструирование атермальных оптических систем для беспроводной лазерной связи // Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Т. 2, № 3(7). С. 9-19. DOI 10.51639/2713-0568-2022-2-3-9. EDN KQYJFS

7. Иванов М.С., Шушков А.В., Макаренко С.И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 2. Исследование достигаемого повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 220-243. DOI 10.24412/2410-9916-2023-1-220-243. EDN QJWYEC

8. Иванов М.С., Шушков А.В., Макаренко С.И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигнального и частотного сетевых ресурсов. Часть 1. Модели и методика повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 125-219. DOI 10.24412/2410-9916-2023-1-125-219. EDN WWMDQN

9. Бен Режеб Т. Б. К. Комбинирование технологий многоантенных систем ММО и неортогонального доступа на основе разреженных последовательностей SCMA // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 7. С. 37-43. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-7-37-43. EDN URQSIG

10. Маджд А., Казаков Л.Н., Кубышкин Е.П. Комбинирование многоантенных систем (ММО) в задаче обнаружения биологических объектов // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2022. № 1(16). С. 11-17. EDN JUMRMC

11. Дворников С.В., Колюховский В.С., Симонов А.Н. Способ частотнопространственной селекции радиоизлучений с помощью триортогональной антенной системы // Информационно-управляющие системы. 2020. № 1(104). С. 63-72. DOI 10.31799/1684-8853-2020-1-63-72. EDN YYEETK

12. Калачиков А.А., Безгодкин Р.О., Петров И.А., Винников А.А. Анализ характеристик алгоритмов прекодирования сигналов в MU-MIMO системе с использованием модели канала QuaDRiGa // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8, № 1. С. 41-47. DOI 10.31854/1813-324X-2022-8-1-41-47. EDN BIREDT

13. Hiari O., Mesleh R.M. Novel Transmitter Designs for Variant Signed Quadrature Space Modulation Techniques // IEEE Systems Journal. 2022. Vol. 16, No. 2, pp. 3437-3445. DOI 10.1109/jsyst.2021.3070369. EDN RDPQOF

14. Hiari O., Mesleh R.M. Hybrid Transmitter Hardware Models for Reliable Implementations of Space Modulation Techniques // IEEE Transactions on Communications. 2022. Vol. 70, No. 5, pp. 2992-3005. DOI 10.1109/TCOMM.2022.3157317. EDN WBOGQD

15. Singh V.K.M.R., Karupiah M. Mitigation of atmospheric losses using dual-polarized 16-QAM MIMO technique in free-space optical system in various weather conditions // International Journal of Communication Systems. 2024. DOI 10.1002/dac.5816. EDN UQFTUQ

16. Касьянов А.О., Потупак М.В. Применение графического процессора для цифровой обработки сигналов в реальном масштабе

времени // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 3(239). С. 79-91. DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-79-91. EDN ALUVTB

17. *Алышев Ю.В., Николаев Б.И.* Параллельная обработка пространственно-разнесенных сигналов в каналах с многолучевостью // Электросвязь. 2006. № 7. С. 19-21. EDN HUGFJR

18. *Малашенко Ю.Е., Назарова И.А.* Оценка предельных распределений пропускной способности в многопользовательской сети при передаче межузловых потоков по кратчайшим маршрутам // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2022. № 5. С. 90-101. DOI 10.31857/S0002338822040138. EDN B GXIZJ

19. *Дворников С.В., Бальков А.А.* Предложения по управлению скоростью передачи и помехоустойчивостью сигналов с перестановочной частотной модуляцией // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 6. С. 20-26. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26. EDN LLPGYL

20. *Пашищев В.П., Белоконов Д.А., Цимбал В.А.* и др. Методика оценки влияния диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты на помехоустойчивость коротковолновой связи // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 12. DOI 10.30898/1684-1719.2024.12.2. EDN VMORYF

21. *Фаустов И.С., Токарев А.Б., Козьмин А.В.* Реализация разнесенного приема при радиоконтроле частотно-модулированных сигналов // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 7. С. 26-30. DOI 10.18127/j00338486-202407-05. EDN DPKEGA

22. *Егоров В.В., Маслаков М.Л.* Быстрое сложение двух сигналов, принятых из канала с замираниями // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Материалы XXVII Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 03-07 июня 2024 г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. С. 78-84. EDN VFVEUC

23. *Журавлев А.П., Рюмишин К.Ю., Атакищев О.И.* и др. Параметры модуляции современных систем связи // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 7. С. 13-20. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-7-13-20. EDN JSMWIR

24. *Дворников С.В., Марков Е.В., Маноши Э.А.* Повышение помехозащищенности передач декаметровых радиоканалов в условиях непреднамеренных помех // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 6. С. 4-9. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9. EDN KHPWMU

25. *Роцинский П.С., Федоров А.С.* Исследование системы передачи данных стандарта Wi-Fi 6 с использованием технологий OFDMA и MU-MIMO // International Journal of Professional Science. 2022. № 11-2. С. 194-199. DOI 10.54092/25421085-2022-112-194. EDN AMMEAC

26. *Davydov V., Moroz A., Fokin G., Lazarev V.* Instantaneous Interference Evaluation Model for Smart Antennas in 5G Ultra-Dense Networks // Lecture Notes in Computer Science. 2022. Vol. 13158 LNCS. P. 365-376. DOI 10.1007/978-3-030-97777-1-31. EDN UGQDAA

27. *Fokin G., Bachevsky S., Sevidov V.* System Level Performance Evaluation of Location Aware Beamforming in 5G Ultra-Dense Networks // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech), Saint Petersburg, 15–16 октября 2020 года. Vol. 2020. Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, pp. 94-97. DOI 10.1109/EEExPolytech50912.2020.9243970. EDN OLACFI

28. *Simonov A., Fokin G., Sevidov V.* et al. Polarization Direction Finding Method of Interfering Radio Emission Sources // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, St. Petersburg, Russia, 26-28 августа 2019 г. Vol. 11660. St. Petersburg, Russia: Springer Verlag, 2019, pp. 208-219. DOI 10.1007/978-3-030-30859-9_18. EDN GWKCCM

29. *Wang Sh., He F., Dong Zh.* A Space-Time Coding Array Sidelobe Optimization Method Combining Array Element Spatial Coding and Mismatched Filtering // Remote Sensing. 2024. Vol. 16, No. 17. P. 3322. DOI 10.3390/rs16173322. EDN AFVVYO

30. *Дворников С.В., Якушенко С.А.* Управление параметрами устойчивости инфокоммуникационной системы в условиях деструктивных воздействий // Радиотехника. 2023. Т. 87, № 6. С. 23-31. DOI 10.18127/j00338486-202306-03. EDN EXKZOH

31. *Нгуен В.Н.Т.* Повышение эффективности схемы Аламути в беспроводных MIMO системах передачи информации при наличии помех // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 : Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань, 02-04 марта 2022 г / Под общей редакцией О.В. Милвзорова. Том 1. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2022. С. 122-128. EDN NLMWLB

32. *Matemu A.E., Lee K.* Spatial Modulation and Generalized Spatial Modulation for Dynamic Metasurface Antennas // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2025. Vol. 24, No. 1, pp. 783-795. DOI 10.1109/twc.2024.3501337. EDN DBKIHS

33. *Singh Ch., Raja P.C.K.* Hybrid optimization assisted transmit antenna selection for massive MIMO technology // Multimedia Tools and Applications. 2024. Vol. 83, No. 7, pp. 20909-20929. DOI 10.1007/s11042-023-16053-x. EDN JLIZQG

34. *Якушенко С.А., Дворников С.В.* Обоснование требований к показателю доступности глобальной навигационной спутниковой системе для потребителей бассейнов внутренних водных путей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18, № 4. С. 22-29. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-4-22-29. EDN ZSZAHE

35. *Dvornikov S.S., Zheglov K.D., Dvornikov S.V.* SSB signals with controlled pilot level // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Vol. 17, No. 3, pp. 41-47. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-3-41-47. EDN VUZDRH

36. *Khokhar S. Ud. D., Peng Q., Yasir M. Noor* Output Linearization of Single-Input Single-Output Fuzzy System to Improve Accuracy and Performance // Computers, Materials and Continua. 2023. Vol. 75, No. 2, pp. 2413-2427. DOI 10.32604/cmc.2023.036148. EDN QUYNYL

ALGORITHM FOR SELECTING THE MIMO SYSTEM SCHEME IN RADIO LINKS WITH MULTIPLE SPATIAL CHANNELS

Sergey A. Yakushenko, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, was16@mail.ru
Sergey V. Dvornikov, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, practicdsv@yandex.ru

Abstract

The paper considers wireless radio links with multi-antenna systems. The aim of the re-research is to analyze and evaluate the capacity of multi-antenna radio links of various schemes in a complex signal-noise environment and to build an optimal mobile communication system based on radio links with MIMO technologies. The paper evaluates the capacity of radio links with various schemes using MIMO systems technology in Gaussian and Rayleigh channels. It is established that the capacity of radio links depends on many factors – radio link scheme options, the number of antennas, signal reception and processing methods, as well as the communication range, i.e. where the subscriber is located - near the base station or at the edge of the service area, as well as the communication conditions - in a large or sparsely populated city, in very rugged terrain or flat, etc. A given radio link capacity can be achieved in various ways - by using one or another MIMO technology scheme, increasing the degree of multiplexing or the number of antennas for diversity reception. For example, the multiplexing technology in MIMO systems is effective at high values of signal-to-noise ratios, and the diversity reception technology (SIMO) is quite effective at low values. Therefore, it is expedient to combine variants of MIMO system schemes and signal reception technologies in such a way as to achieve the best efficiency of the radio link, in terms of throughput and noise immunity with minimal costs of antenna system elements. Prospective base stations will have hundreds of antenna elements that are distributed over subscriber radio lines depending on the need for throughput and communication quality. However, as the evaluation of MIMO system design schemes has shown, the specified values of the indicators can be achieved by various methods of combining antennas, their number, receiving and processing signals in radio line subchannels. Thus, with many subscribers in the service area, located in different communication conditions, the problem of optimally distributing the antenna resource over subscriber radio lines arises in order to achieve the maximum throughput of the communication system as a whole. The paper proposes an approach to distributing the antenna resource of a base station in its service area and a method for synthesizing the optimal structure of a mobile network with a large number of subscribers (optimal distribution of the antenna resource over the network's radio lines). The throughput as a property associated with the purpose of the system and the noise immunity of signals to total interference as a property of communication quality, as well as the costs of their implementation, are selected as an efficiency indicator for a communication system with multi-antenna radio lines. The research results can be used to develop algorithms for maximizing the throughput in the service area of a mobile base station under difficult electromagnetic conditions, the dynamics of changes in the information load in radio lines and the movement of subscriber terminals in a variety of terrain and urban topology. Multi-antenna systems should rationally combine algorithms for combating fading and increasing the throughput of lines, which can be solved by the proposed algorithm. Therefore, further research is the optimal distribution of antenna resources of base stations, taking into account the available resource of subscriber stations according to the criterion of performance and resistance of lines to signal fading, i.e. resolution of the compromise between the capacity and stability of the radio link, taking into account external destructive effects on the mobile radio links. In addition, the inverse task is also possible – the formation of requirements for the resources of the base and subscriber stations to achieve the required target indicators of the mobile communication system in a given service area.

Keywords: radio lines, multi-antenna systems, maximum bandwidth, optimal distribution of antenna elements

References

- [1] R. Khan, "Hybrid-NOMA for Wireless Communication System," *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2023. Vol. 9, No. 3, pp. 104-111. DOI 10.31854/1813-324X-2023-9-3-104-111.
- [2] M. Singh, M. L. Singh, R. Singh, "Statistical channel modeling of intensity fluctuations in the turbulent under-water wireless optical communication system," *Opticheskiy Zhurnal*. 2022. Vol. 89, No. 12, pp. 19-37. DOI 10.17586/1023-5086-2022-89-12-19-37.
- [3] V.M. Seleznev, "A high-gain steerable reflective array antenna for V-band wireless communications," *Radioengineering*. 2022. Vol. 86, No. 3, pp. 122-123. DOI 10.18127/j00338486-202203-11.
- [4] S.A. Yakushenko, S.V. Dvornikov, A.F. Kryachko et al., "Methodology for assessing the stability of a multi-channel radio communication network based on solving the Cauchy problem for a system of Kolmogorov matrix equations describing its state," *Radio Engineering*. 2020. Vol. 84, No. 12 (24), pp. 112-120. DOI 10.18127 / j00338486-202012 (24) -11.
- [5] S.V. Dvornikov, S.S. Dvornikov, K.D. Zheglov, "Proactive monitoring of the suitability of radio channels in the frequency hopping mode," *T-Comm*. 2022. Vol. 16, No. 11, pp. 15-20. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-11-15-20.
- [6] A.V. Baskakova, S.N. Kuznetsov, S.E. Shirobakin, "Design of athermal optical systems for wireless laser communications," *Lasers. Measurements. Information*. 2022. Vol. 2, No. 3(7), pp. 9-19. DOI 10.51639/2713-0568_2022_2_3_9.
- [7] M.S. Ivanov, A.V. Shushkov, S.I. Makarenko, "Increasing the data transfer rate in the airborne radio communication network for aircraft control due to the adaptive use of energy, signal and frequency network resources. Part 2. Study of the achieved increase in data transfer rate," *Control, Communication and Security Systems*. 2023. No. 1, pp. 220-243. DOI 10.24412/2410-9916-2023-1-220-243.
- [8] M.S. Ivanov, A.V. Shushkov, S.I. Makarenko, "Increasing the data transfer rate in the airborne radio communication network for aircraft control due to the adaptive use of energy, signal and frequency network resources. Part 1. Models and methods for increasing the data transmission rate," *Control, communication and security systems*. 2023. No. 1, pp. 125-219. DOI 10.24412/2410-9916-2023-1-125-219.
- [9] T.B.K. Ben Rejeb, "Combining technologies of multi-antenna MIMO systems and non-orthogonal access based on sparse SCMA sequences," *T-Comm*, 2024. Vol. 18, No. 7, pp. 37-43. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-7-37-43.
- [10] A. Madzhd, L.N. Kazakov, E.P. Kubyshkin, "Combining multi-antenna systems (MIMO) in the problem of detecting biological objects," *Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense*, 2022. No. 1 (16), pp. 11-17.
- [11] S.V. Dvornikov, V.S. Konyukhovskiy, A.N. Simonov, "Method of frequency-spatial selection of radio emissions using a triorthogonal antenna system," *Information and control systems*. 2020. No. 1(104), pp. 63-72. DOI 10.31799/1684-8853-2020-1-63-72.

- [12] A.A. Kalachikov, R.O. Bezgodkin, I.A. Petrov, A.A. Vinnikov, "Analysis of the characteristics of signal precoding algorithms in a MU-MIMO system using the QuaDRiGa channel model," *Proceedings of educational institutions of communication*. 2022. Vol. 8, No. 1, pp. 41-47. DOI 10.31854/1813-324X-2022-8-1-41-47.
- [13] O. Hiari, R.M. Mesleh, "Novel Transmitter Designs for Variant Signed Quadrature Space Modulation Techniques," *IEEE Systems Journal*. 2022. Vol. 16, No. 2, pp. 3437-3445. DOI 10.1109/jsyst.2021.3070369.
- [14] O. Hiari, R. Mesleh, "Hybrid Transmitter Hardware Models for Reliable Implementations of Space Modulation Techniques," *IEEE Transactions on Communications*. 2022. Vol. 70, No. 5, pp. 2992-3005. DOI 10.1109/TCOMM.2022.3157317.
- [15] V.K.M.R. Singh, M. Karuppiah, "Mitigation of atmospheric losses using dual-polarized 16-QAM MIMO technique in free-space optical system in various weather conditions," *International Journal of Communication Systems*. 2024. DOI 10.1002/dac.5816.
- [16] A.O. Kasyanov, M.V. Potipak, "Application of a graphics processor for digital signal processing in real time," *Bulletin of SFedU. Technical sciences*. 2024. No. 3 (239), pp. 79-91. DOI 10.18522 / 2311-3103-2024-3-79-91.
- [17] Yu.V. Alyshev, B.I. Nikolaev, "Parallel processing of spatially diverse signals in channels with multi-path," *Electrosvyaz*. 2006. No. 7, pp. 19-21.
- [18] Yu.E. Malashenko, I.A. Nazarova, "Estimation of the Limit Distributions of Throughput in a Multi-User Network for Transmitting Inter-Node Flows along the Shortest Routes," *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Theory and Systems*. 2022. No. 5, pp. 90-101. DOI 10.31857/S0002338822040138.
- [19] S.V. Dvornikov, A.A. Balykov, "Proposals for controlling the transmission rate and noise immunity of signals with permutation frequency modulation," *T-Comm*. 2020. Vol. 14, No. 6, pp. 20-26. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-6-20-26.
- [20] V.P. Pashintsev, D.A. Belokon, V.A. Tsymbal, "Methodology for assessing the influence of ionospheric diffuseness and the choice of operating frequency on the noise immunity of shortwave communications," *Journal of Radio Electronics*. 2024. No. 12. DOI 10.30898/1684-1719.2024.12.2.
- [21] I.S. Faustov, A.B. Tokarev, A.V. Kozmin, "Implementation of diversity reception in radio monitoring of frequency-modulated signals," *Radio engineering*. 2024. Vol. 88, No. 7, pp. 26-30. DOI 10.18127/j00338486-202407-05.
- [22] V.V. Egorov, M.L. Maslakov, "Fast addition of two signals received from a channel with fading," *Wave electronics and infocommunication systems: Proceedings of the XXVII International scientific conference*. In 3 parts, St. Petersburg, June 03-07, 2024. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2024, pp. 78-84.
- [23] A.P. Zhuravlev, K.Yu. Ryumshin, O.I. Atakishchev et al., "Modulation parameters of modern communication systems," *T-Comm*. 2023. Vol. 17, No. 7, pp. 13-20. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-7-13-20.
- [24] S.V. Dvornikov, E.V. Markov, E.A. Manoshi, "Increasing the noise immunity of decimeter radio channel transmissions under unintentional interference," *T-Comm*. 2021. Vol. 15, No. 6, pp. 4-9. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-6-4-9.
- [25] R.S. Roshchinsky, A.S. Fedorov, "Study of the Wi-Fi 6 data transmission system using OFDMA and MU-MIMO technologies," *International Journal of Professional Science*. 2022. No. 11-2, pp. 194-199. DOI 10.54092/25421085_2022_112_194.
- [26] V. Davydov, A. Moroz, G. Fokin, V. Lazarev, "Instantaneous Interference Evaluation Model for Smart Antennas in 5G Ultra-Dense Networks," *Lecture Notes in Computer Science*. 2022. Vol. 13158 LNCS, pp. 365-376. DOI 10.1007/978-3-030-97777-1_31.
- [27] G. Fokin, S. Bachevsky, V. Sevidov, "System Level Performance Evaluation of Location Aware Beamforming in 5G Ultra-Dense Networks," *IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, Saint Petersburg, 15-16 October 2020. Vol. 2020. Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, pp. 94-97. DOI 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243970.
- [28] A. Simonov, G. Fokin, V. Sevidov et al., "Polarization Direction Finding Method of Interfering Radio Emission Sources," *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*, St. Petersburg, Russia, 26-28 August 2019. Vol. 11660. St. Petersburg, Russia: Springer Verlag, 2019, pp. 208-219. DOI 10.1007/978-3-030-30859-9_18.
- [29] Sh. Wang, F. He, Zh. Dong, "A Space-Time Coding Array Sidelobe Optimization Method Combining Array Element Spatial Coding and Mismatched Filtering," *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 17, P. 3322. DOI 10.3390/rs16173322.
- [30] S.V. Dvornikov, S.A. Yakushenko, "Control of stability parameters of infocommunication system under destructive influences," *Radio engineering*. 2023. Vol. 87, No. 6, pp. 23-31. DOI 10.18127/j00338486-202306-03.
- [31] V. N. T. Nguyen, "Improving the efficiency of the Alamouti scheme in wireless MIMO information transmission systems in the presence of interference," *Modern technologies in science and education - STNO-2022: Collection of works of the V International scientific and technical forum*. In 10 volumes, Ryazan, March 02-04, 2022 / Edited by O.V. Milovzorov. Vol. 1. Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University, 2022, pp. 122-128.
- [32] A. E. Matemu, K. Lee, "Spatial Modulation and Generalized Spatial Modulation for Dynamic Metasurface Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2025. Vol. 24, No. 1, pp. 783-795. DOI 10.1109/twc.2024.3501337.
- [33] Ch. Singh, P. C. K. Raja, "Hybrid optimization assisted transmit antenna selection for massive MIMO technology," *Multimedia Tools and Applications*. 2024. Vol. 83, No. 7, pp. 20909-20929. DOI 10.1007/s11042-023-16053-x.
- [34] S.A. Yakushenko, S.V. Dvornikov, "Justification of the requirements for the indicator of availability of the global navigation satellite system for consumers of inland waterway basins," *T-Comm*. 2024. Vol. 18, No. 4, pp. 22-29. DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-4-22-29.
- [35] S.S. Dvornikov, K.D. Zheglov, S.V. Dvornikov, "SSB signals with controlled pilot level," *T-Comm*. 2023. Vol. 17, No. 3, pp. 41-47. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-3-41-47.
- [36] S. Ud. D. Khokhar, Q. Peng, M. Yasir Noor, "Output Linearization of Single-Input Single-Output Fuzzy System to Improve Accuracy and Performance," *Computers, Materials and Continua*. 2023. Vol. 75, No. 2, pp. 2413-2427. DOI 10.32604/cmc.2023.036148.

Information about authors:

Sergey A. Yakushenko, Professor of the Department, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg, Russia

Sergey V. Dvornikov, Professor of the Department, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Doctor of Technical Sciences, Professor, St. Petersburg, Russia