

Научная статья

УДК 621.391.1

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-3-59-70>

EDN:XTSWWS



Исследование и разработка алгоритмов обработки сигналов в системах MIMO с применением пространственно-временных кодов

Конг Куен Фам , fam.kk@sut.ru

Евгений Иванович Глушанков, glushankov.ei@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. С развитием цифровых радиотехнических систем передачи информации возрастают требования к спектральной эффективности мобильных и гибридных систем и сетей радиосвязи. Для удовлетворения этих требований в современных системах радиосвязи широко применяется технология многоканальных антенных систем (MIMO, аббр. от англ. Multiple-Input Multiple-Output). Использование нескольких передающих и приемных антенн в системах MIMO предъявляет повышенные требования по производительности алгоритмов обработки сигналов. В связи с этим задача разработки быстрых и эффективных алгоритмов обработки сигналов приобретает актуальность.

Цель исследования заключается в анализе и оптимизации пространственно-временных методов кодирования, а также алгоритмов обработки сигналов в системах MIMO. Разработан алгоритм обработки сигналов, обеспечивающий необходимую спектральную эффективность, при существенно сниженной вычислительной сложности. В настоящем исследовании применяются **методы** численного моделирования в среде MATLAB для сравнения эффективности различных алгоритмов обработки сигналов в системах MIMO в канале с замираниями.

В ходе **решения** поставленных задач рассмотрены принципы построения пространственно-временных кодовых матриц для методов кодирования, а также проанализированы методы когерентной демодуляции сигналов, на основе чего предложен алгоритм, обладающий пониженной вычислительной сложностью. Вычисление обратной матрицы канала в алгоритмах когерентной демодуляции, особенно для матриц высокой размерности, является вычислительно затратной операцией. В связи с этим научная **новизна** работы заключается в разработке и применении нового подхода к аппроксимации обратной матрицы, основанного на совместном использовании итерационного метода Якоби и разложения в ряд Неймана.

Практическая значимость. Разработанный алгоритм может быть использован при построении систем MIMO с большим числом передающих и приемных антенн, а также при применении методов кодирования с неортогональной структурой для увеличения скорости кодирования. В таких системах использование методов демодуляции требует значительных вычислительных ресурсов для нахождения обратной матрицы, что ограничивает производительность в реальных условиях.

Ключевые слова: система MIMO, пространственно-временные методы кодирования, метод максимального правдоподобия, метод декоррелятора, метод минимизации среднеквадратичной ошибки

Ссылка для цитирования: Фам К.К., Глушанков Е.И. Исследование и разработка алгоритмов обработки сигналов в системах MIMO с применением пространственно-временных кодов // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 3. С. 59–70. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-3-59-70. EDN:XTSWWS

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-3-59-70>

EDN:XTSWWS

Research and Development of Signal Processing Algorithms in MIMO Systems Using Space-Time Codes

 Kong K. Fam ✉, fam.kk@sut.ru Evgeniy I. Glushankov, glushankov.ei@sut.ru

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Annotation

Abstract: With the advancement of digital radio communication systems, there is a growing demand for enhanced spectral efficiency in mobile and hybrid radio systems and networks. To meet these requirements, Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) technology is extensively employed in modern radio communication systems. The use of multiple transmitting and receiving antennas in MIMO systems imposes stringent performance requirements on signal processing algorithms. Consequently, the development of fast and efficient signal processing algorithms is a task of significant relevance.

The aim of this study is to analyze and optimize space-time coding techniques and signal processing algorithms for MIMO systems. The research focuses on developing an algorithm that ensures the required level of performance while significantly reducing computational complexity.

Methods. This study utilizes numerical simulation methods within the MATLAB environment to compare the performance of various signal processing algorithms in MIMO systems over a fading channel.

Results. In addressing the research objectives, the principles of constructing space-time code matrices for different coding methods were examined, and coherent signal demodulation techniques were analyzed. Based on this analysis, an algorithm with reduced computational complexity is proposed. A key element of **scientific novelty** of this work lies in the development and application of a novel approach to approximate the inverse channel matrix, which is a computationally expensive operation, particularly for high-dimensional matrices in coherent demodulation algorithms. This new approach is based on the combined use of the iterative Jacobi method and the Neumann series expansion for the approximation of the matrix inverse.

Practical significance. The developed algorithm can be utilized in the design of MIMO systems with a large number of transmitting and receiving antennas, as well as in the application of non-orthogonal coding schemes to increase the coding rate. In such systems, conventional demodulation methods require significant computational resources for inverting the channel matrix, which limits real-world performance. The proposed algorithm mitigates this bottleneck, enabling more practical implementations.

Keywords: MIMO system, space-time coding techniques, Maximum Likelihood method, Zero Forcing detector, Minimum Mean Squared Error method

For citation: Fam K.K., Glushankov E.I. Research and Development of Signal Processing Algorithms in MIMO Systems Using Space-Time Codes. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(3):59–70. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-3-59-70. EDN:XTSWWS

Введение

С развитием современных цифровых систем связи постоянно возрастают требования к повышению их энергетической и спектральной эффек-

тивности [1, 2]. В настоящее время известно множество решений данной задачи, основанных на следующих подходах: разработке адаптивных систем с обратной связью с целью оптимального выбора схем модуляции и кодирования [3, 4];

использовании ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM, *аббр. от англ.* Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) [5, 6]; а также применении технологий многоантенных систем связи (MIMO, *аббр. от англ.* Multiple Input, Multiple Output) [7–9].

Данная работа посвящена исследованию последней из вышеуказанных технологий – технологии MIMO, включая методы пространственно-временного блочного кодирования, а также описание различных подходов к обработке сигналов на приемной стороне в данной системе. Рассмотрим систему MIMO с N передающими и M приемными антеннами.

В этом случае модель принимаемого сигнала может быть представлена следующим образом:

$$y = \mathbf{H}s + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где s – вектор переданных сигналов размерности $M \times 1$; $\mathbf{H}$ – матрица комплексных коэффициентов передачи канала MIMO размерности $M \times N$; $\mathbf{n}$ – гауссовский случайный вектор шума размерности $M \times 1$.

В системах MIMO применяются различные методы демодуляции, отличающиеся уровнем вычислительной сложности и эффективностью. Среди них можно выделить методы: максимального правдоподобия (ML, *аббр. от англ.* Maximum Likelihood); декоррелятора (ZF, *аббр. от англ.* Zero Forcing); метод минимизации среднеквадратичной ошибки (MMSE, *аббр. от англ.* Minimum Mean Squared Error).

Выражения, используемые для оценки переданных сигналов в рамках указанных методов демодуляции, описываются следующими формулами:

$$\hat{s}_{ML} = \underset{s \in \Theta^I}{\operatorname{argmin}} \|y - \mathbf{H}s\|^2, \quad (2)$$

$$\hat{s}_{ZF} = (\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}'y, \quad (2)$$

$$\hat{s}_{MMSE} = (\mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma_n^2\mathbf{I})^{-1}\mathbf{H}'y, \quad (3)$$

где Θ^I – дискретное множество значений I -мерного вектора s комплексных информационных символов, определяемое выбранным методом модуляции; матрица $\mathbf{H}'$ – комплексно-сопряженная и транспонированная матрица $\mathbf{H}$.

Как известно, применение метода ML на практике затруднено из-за его чрезвычайно высокой вычислительной сложности, особенно при использовании модуляции высокого порядка или большом числе передающих антенн N . Из выражений (2 и 3) следует, что для реализации методов ZF и MMSE необходимо вычисление обратной матрицы, что представляет собой достаточно трудоемкую операцию с вычислительной точки зрения [10, 11].

Основная идея предложенного в данной статье решения заключается в использовании прибли-

женных методов для вычисления обратной матрицы с целью снижения вычислительной сложности при сохранении эффективности рассматриваемых методов. Кроме того, предлагается приближенное вычисление обратной матрицы, направленное на оптимизацию как точности, так и вычислительной сложности.

Ортогональные пространственно-временные блочные коды OSTBC

К наиболее простым схемам кодирования относятся ортогональные пространственно-временные блочные коды (OSTBC, *аббр. от англ.* Orthogonal Space-Time Block Code), в частности схема, предложенная Аламоути для случая двух передающих антенн [12], пространственно-временная кодовая матрица (ПВКМ) $\mathbf{S}_{N,R}$, которая имеет следующий вид:

$$\mathbf{S}_{N,R} = \mathbf{S}_{2,1} = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{pmatrix},$$

где s_i^* – комплексно-сопряженное значение символа s_i .

Основной принцип работы схемы Аламоути заключается в следующем [13]: символы используемого модуляционного алфавита (s_1 и s_2) передаются одновременно с двух антенн (разнесение по пространству) в течение двух временных интервалов (разнесение по времени). В представленной схеме скорость пространственно-временного кода R , определяемая как отношение числа передаваемых модулированных информационных символов k к числу временных интервалов p , необходимых для их передачи, составляет $R = \frac{k}{p} = 1$. При этом достигаемая степень разнесения равна $2M$. С целью повышения степени разнесения в работах В. Тароха [13], Г. Ганесана [14] и М.К. Арти [15] были предложены методы построения пространственно-временных кодов, обеспечивающих степень разнесения, равную NM , однако характеризующихся пониженной скоростью кодирования $R < 1$.

Ниже представлены варианты построения ПВКМ со скоростью кодирования $R = \frac{1}{2}$ и $R = \frac{3}{4}$ для случая использования трех ($\mathbf{S}_{3,1/2}$, $\mathbf{S}_{3,3/4}$) и четырех передающих антенн ($\mathbf{S}_{4,1/2}$, $\mathbf{S}_{4,3/4}$):

$$\mathbf{S}_{3,1/2} = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & s_1^* & -s_2^* & -s_3^* & -s_4^* \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 & s_2^* & s_1^* & s_4^* & -s_3^* \\ s_3 & -s_4 & s_1 & -s_2 & s_3^* & s_4^* & s_1^* & -s_2^* \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{S}_{3,3/4} = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2 & s_3 & 0 \\ s_2 & s_1 & 0 & s_3 \\ s_3 & 0 & -s_1 & -s_2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{S}_{4,2} = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & -s_4 & s_1^* & -s_2^* & -s_3^* & -s_4^* \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 & s_2^* & s_1^* & s_4^* & -s_3^* \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 & s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \\ s_4 & s_3 & -s_2 & s_1 & s_4^* & s_3^* & -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{S}_{4,4} = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & 0 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 & s_3 \\ s_3^* & 0 & -s_1^* & s_2 \\ 0 & s_3^* & -s_2^* & -s_1 \end{pmatrix}.$$

Квазиортогональные пространственно-временные блочные коды

Проведенный выше анализ методов OSTBC показывает, что увеличение числа передающих антенн более двух позволяет повысить степень разнесения. Однако при этом скорость кодирования R становится меньше единицы, что приводит к снижению спектральной эффективности при передаче информации. В связи с этим далее рассматривается альтернативный подход – квазиортогональные пространственно-временные блочные коды (QOSTBC, *аббр. от англ. Quasi-Orthogonal Space-Time Block Codes*), обладающие рядом привлекательных свойств, присущих рассмотренным выше ортогональным кодам.

Рассмотрим пример построения ПВКМ по методу QOSTBC при использовании трех и четырех передающих антенн ($\mathbf{S}_{3,1}$ и $\mathbf{S}_{4,1}$) [16–19]:

$$\mathbf{S}_{3,1} = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* & s_3 & -s_4^* \\ s_2 & s_1^* & s_4 & s_3^* \\ -s_3 & -s_4^* & s_1 & s_2^* \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{S}_{4,1} = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ s_3 & s_4 & s_1 & s_2 \\ -s_4^* & s_3^* & -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix}.$$

Нетрудно заметить, что в данном случае скорость кодирования составляет $R = 1$.

Неортогональные пространственно-временные блочные коды

Продолжим рассмотрение, обратив внимание на метод кодирования, обеспечивающий скорость ПВК R , превышающую единицу, а, следовательно, и более высокую спектральную эффективность системы связи. Речь идет о неортогональных пространственно-временных блочных кодах, которые в литературе часто обозначаются обобщенным термином STBC (*аббр. от англ. Space-Time Block Code*). В этом случае модулированные информационные символы s_i передаются одновременно через различные передающие антенны в течение нескольких временных интервалов, что приводит к ситуации, при которой число передаваемых модулированных символов k превышает количество временных интервалов p , необходимых для их

передачи, то есть $R = \frac{k}{p} > 1$. Несмотря на то, что данный метод характеризуется повышенной вычислительной сложностью алгоритмов демодуляции, а также уступает по эффективности ранее рассмотренным ортогональным схемам, благодаря высокой скорости кодирования он продолжает находить применение в системах беспроводной связи, ориентированных на высокоскоростную передачу данных и повышенную спектральную эффективность.

Ниже приведены примеры построения ПВКМ по методу STBC при использовании трех и четырех передающих антенн со скоростью кодирования $R = 2$ ($\mathbf{S}_{3,2}$ и $\mathbf{S}_{4,2}$) [20, 21]:

$$\mathbf{S}_{3,2} = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* & s_5 & -s_6^* \\ s_2 & s_1^* & s_6 & s_5^* \\ s_7 & -s_8^* & s_3 & s_4^* \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{S}_{4,2} = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ s_5 & s_7 & s_6 & s_8 \\ -s_7^* & s_5^* & -s_8^* & s_6^* \end{pmatrix}.$$

Алгоритмы демодуляции

Из выражений (2 и 3) следует, что точность и вычислительная сложность алгоритмов демодуляции ZF и MMSE в значительной степени определяются операциями умножения матриц $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$, а также вычислением обратной матрицы к полученному произведению. К сожалению, операция инверсии матрицы в большинстве случаев является вычислительно затратной. Далее будет проведен анализ методов вычисления обратной матрицы $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ на примере классической схемы пространственно-временного кодирования Аламоути для системы MIMO конфигурации 2×2 . Как уже было изложено ранее, в соответствии с методом Аламоути, модулированные символы s_1 и s_2 передаются одновременно с двух передающих антенн в течение двух временных интервалов t_1 и t_2 .

Таким образом, выражение (1), а также ПВКМ $\mathbf{S}_{2,1}$ и структура принимаемых сигналов на двух приемных антеннах могут быть представлены в следующем виде [22–24]:

$$y_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1, \quad (4)$$

$$y_2 = -h_1 s_2^* + h_2 s_1^* + n_2 = h_2 s_1^* - h_1 s_2^* + n_2. \quad (5)$$

Выражения (4 и 5) можно объединить:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ -h_2^* & h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Из матрицы $\mathbf{H}$, полученной в выражении (6), можно получить следующий результат:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{H}'\mathbf{H})_{N,R} &= (\mathbf{H}'\mathbf{H})_{2,1} = \begin{bmatrix} h_1^* & -h_2 \\ h_2^* & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ -h_2^* & h_1^* \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 \\ 0 & |h_1|^2 + |h_2|^2 \end{bmatrix} = \\
 &= (|h_1|^2 + |h_2|^2)\mathbf{I}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогичным образом, для случая использования метода OSTBC с тремя и четырьмя передающими антеннами, можно получить следующий результат:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{H}'\mathbf{H})_{3,1} &= \left(2 \sum_{i=1}^3 |h_i|^2\right) \mathbf{I}, \\
 (\mathbf{H}'\mathbf{H})_{3,3} &= \left(\sum_{i=1}^3 |h_i|^2\right) \mathbf{I}, \\
 (\mathbf{H}'\mathbf{H})_{4,1} &= \left(2 \sum_{i=1}^4 |h_i|^2\right) \mathbf{I}, \\
 (\mathbf{H}'\mathbf{H})_{4,3} &= \left(\sum_{i=1}^4 |h_i|^2\right) \mathbf{I}.
 \end{aligned} \quad (8)$$

Как следует из уравнений (7 и 8), ключевой особенностью ортогональных пространственно-временных блочных кодов (OSTBC) является то, что соответствующая им матрица является диагональной $\mathbf{H}'\mathbf{H}$. Это свойство позволяет свести процедуру демодуляции по критериям ZF и MMSE к набору поэлементных скалярных делений, что значительно снижает общую вычислительную сложность. В отличие от этого, для неортогональных кодов, в частности, QOSTBC и STBC, описываемых в выражениях (9 и 10), матрица $\mathbf{H}'\mathbf{H}$ имеет недиагональную структуру. Это обуславливает необходимость выполнения полного матричного обращения, сложность которого критически зависит от числа передающих антенн и порядка модуляции [25, 26]. Таким образом, требуется разработка таких алгоритмов демодуляции, которые, с одной стороны, могли бы работать с высокоскоростными неортогональными кодами, а с другой - обладали бы значительно меньшей вычислительной сложностью по сравнению с методом прямого обращения матрицы. Решение этой задачи является ключом к практической реализации перспективных систем MIMO.

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{H}'\mathbf{H})_{4,1} &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 & 0 & h_1 h_3^* + h_3 h_1^* + h_2 h_4^* + h_4 h_2^* & 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 & 0 & h_1 h_3^* + h_3 h_1^* + h_2 h_4^* + h_4 h_2^* \\ h_3 h_1^* + h_1 h_3^* + h_4 h_2^* + h_2 h_4^* & 0 & \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 & 0 \\ 0 & h_3 h_1^* + h_1 h_3^* + h_4 h_2^* + h_2 h_4^* & 0 & \sum_{i=1}^4 |h_i|^2 \end{bmatrix} \quad (9) \\
 (\mathbf{H}'\mathbf{H})_{4,2} &= \begin{bmatrix} |h_1|^2 & -h_1 h_2^* & 0 & 0 & h_1 h_3^* & 0 & -h_1 h_4^* & 0 \\ -h_2 h_1^* & |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_2 h_4^* + h_1 h_3^* & 0 \\ 0 & 0 & |h_1|^2 & -h_1 h_2^* & 0 & h_1 h_3^* & 0 & -h_1 h_4^* \\ 0 & 0 & -h_2 h_1^* & |h_1|^2 + |h_2|^2 & 0 & -h_2 h_3^* & 0 & 0 \\ h_3 h_1^* & 0 & 0 & 0 & |h_3|^2 & 0 & -h_3 h_4^* & 0 \\ 0 & 0 & h_3 h_1^* & -h_3 h_2^* & 0 & |h_3|^2 & 0 & -h_3 h_4^* \\ -h_4 h_1^* & h_4 h_2^* + h_3 h_1^* & 0 & 0 & -h_4 h_3^* & 0 & |h_3|^2 + |h_4|^2 & 0 \\ 0 & 0 & -h_4 h_1^* & 0 & 0 & -h_4 h_3^* & 0 & |h_3|^2 + |h_4|^2 \end{bmatrix}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Предлагаемый метод приближенного вычисления обратной матрицы

Основная идея заключается в следующем: сначала положим $\mathbf{A} = \mathbf{H}'\mathbf{H}$, затем, основываясь на идее итерационного метода Якоби [27], матрица $\mathbf{A}$ разлагается на две составляющие матрицы:

$$\mathbf{A} = \mathbf{H}'\mathbf{H} = \mathbf{D} + \mathbf{R} = \mathbf{D}(\mathbf{I} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}).$$

где $\mathbf{R} = \mathbf{A} - \mathbf{D}$ - матрица, содержащая остальные элементы матрицы $\mathbf{A}$; $\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{A})$ - диагональная матрица.

В этом случае вычисление $\mathbf{A}^{-1}$ сводится к вычислению $(\mathbf{I} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{R})^{-1}$:

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{R})^{-1}.$$

Применяя ряд Неймана $(\mathbf{I} - \mathbf{B})^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{B})^k$ [28] для вычисления $(\mathbf{I} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{R})^{-1}$ при $\mathbf{B} = -\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}$, получаем:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{I} + \mathbf{D}^{-1}\mathbf{R})^{-1} &= \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} (-\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R})^k = \mathbf{I} - \mathbf{D}^{-1}\mathbf{R} + (\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R})^2 - \dots
 \end{aligned}$$

При условии сходимости данного ряда (доказательство приводится ниже) матрица $\mathbf{A}^{-1}$ может быть представлена следующим образом:

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{D}^{-1} \sum_{k=0}^{\infty} (-\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R})^k = \mathbf{D}^{-1} - \mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}\mathbf{D}^{-1} + (\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R})^2\mathbf{D}^{-1} - \dots \quad (11)$$

Чтобы доказать сходимость ряда Неймана, заданного выражением (11), необходимо показать, что существует такое натуральное число k , при котором погрешность между приближенным значением и исходным стремится к нулю. Из выражений (7 и 8) видно, что матрица $\mathbf{A} = \mathbf{H}'\mathbf{H} = \mathbf{D}$, следовательно, $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{D}^{-1}$, и ряд Неймана сходится уже при нулевом порядке ($k = 0$).

Докажем сходимость ряда Неймана для матрицы $(\mathbf{H}'\mathbf{H})_{4,1}$, представленной в выражении (9) (доказательства для других случаев аналогичны). В этом случае ряд Неймана сходится, если выполняется следующее условие:

$$\rho(\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}) = \frac{\max(|r_i|)}{|d|} = \frac{\max(|r_i|)}{\sum_i^4 |h_i|^2} < 1,$$

где $\max(|r_i|)$ – это наибольшее значение элементов матрицы $\mathbf{R}$; $|d|$ – это величина элемента на главной диагонали матрицы $\mathbf{D}$.

Таким образом, чтобы доказать выполнение этого условия, необходимо доказать, что:

$$\begin{aligned} |h_1 h_3^* + h_3 h_1^* + h_2 h_4^* + h_4 h_2^*| < \\ < |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Предположим, что $h_i = a_i + b_i j$ и $h_j = a_j + b_j j$, тогда:

$$\begin{aligned} h_i h_j &= (a_i a_j + b_i b_j) + (b_i a_j - a_i b_j)j, \\ \operatorname{Re}(h_i h_j^*) &= a_i a_j + b_i b_j. \end{aligned}$$

Поскольку коэффициент перехода для каждой антенны различен, применяя неравенство Коши – Буняковского, получаем:

$$\begin{aligned} |\operatorname{Re}(h_i h_j^*)| &= |a_i a_j + b_i b_j| \leq \\ &\leq \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \sqrt{a_j^2 + b_j^2} = |h_i| |h_j| < \frac{|h_i|^2 + |h_j|^2}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Преобразуем левую часть выражения (12) в следующий вид:

$$\begin{aligned} |h_1 h_3^* + h_3 h_1^* + h_2 h_4^* + h_4 h_2^*| &= \\ = |2(\operatorname{Re}(h_1 h_3^*) + \operatorname{Re}(h_2 h_4^*))| &= \\ = 2|\operatorname{Re}(h_1 h_3^*) + \operatorname{Re}(h_2 h_4^*)|. \end{aligned} \quad (14)$$

Применив выражение (13) к выражению (14), получаем следующий результат:

$$\begin{aligned} |\operatorname{Re}(h_1 h_3^*) + \operatorname{Re}(h_2 h_4^*)| &\leq |\operatorname{Re}(h_1 h_3^*)| + \\ + |\operatorname{Re}(h_2 h_4^*)| &\leq |h_1| |h_3| + |h_2| |h_4| < \\ < \frac{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Используя выражения (13 и 15), получим:

$$\begin{aligned} |h_1 h_3^* + h_3 h_1^* + h_2 h_4^* + h_4 h_2^*| &< \\ < 2 \frac{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2}{2} &< \\ < |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2. \end{aligned}$$

Таким образом, можно утверждать, что выражение (12) верно, другими словами, $\rho(\mathbf{D}^{-1}\mathbf{R}) < 1$, а следовательно, существует положительное число k , которое удовлетворяет условию $\mathbf{A}_k^{-1} \approx \mathbf{A}^{-1}$.

Для более наглядного сравнения между точным вычислением обратной матрицы $(\mathbf{H}'\mathbf{H})_{4,1}$ и ее приближенным вычислением вышеописанным методом, подставим конкретные значения h_i , которые распределены по закону Рэлея [29] (рисунок 1), предполагая, что сигнал передается через канал с распределением Рэлея. Чтобы сравнить точность приближений, мы используем норму Фробениуса матрицы ошибки.

Для матрицы $\mathbf{E}$ норма Фробениуса $\|\mathbf{E}\|_F$ вычисляется как:

$$\|\mathbf{E}\|_F = \sqrt{\sum_{i,j} |e_{ij}|^2}.$$

где $\mathbf{E}$ – это матрица ошибки, которая равна разности между приближенной обратной матрицей и точной обратной матрицей.

Для обеспечения точности эксперимента процесс генерации значений h_i согласно распределению Рэлея, повторяется L раз ($L = 1000$), и при этом вычисляется матрица $\mathbf{E}$. На рисунке 2 представлены средние значения элементов e_{ij} матрицы $\mathbf{E}$, а также среднее значение $\|\mathbf{E}\|_F$, которое обозначено как общая средняя ошибка после L испытаний. На рисунке 3 представлено значение $\|\mathbf{E}\|_F$ для первых ста испытаний при аппроксимации нулевого и первого порядка.

Из приведенного выше анализа следует, что предложенный метод приближенного вычисления обратной матрицы может быть применен в алгоритмах демодуляции, таких как ZF и MMSE, с целью снижения вычислительной сложности. Исходя из вопроса о том, какого порядка приближение следует выбрать в методе вычисления обратной матрицы для различных методов кодирования, следует отметить, что, как было доказано, для методов кодирования Аламоути и OSTBC приближение нулевого порядка может обеспечить достаточную точность (при высоком качестве принимаемого сигнала, то есть при высоком отношении сигнал / шум). Однако для других методов кодирования

при $R > 1$ это условие не выполняется. Предлагается идея построения алгоритма адаптивной демодуляции сигнала в системе ММО, целью которого является обеспечение требуемой точности, а также учет вычислительной сложности. Общая структура данного алгоритма представлена на рисунке 4.

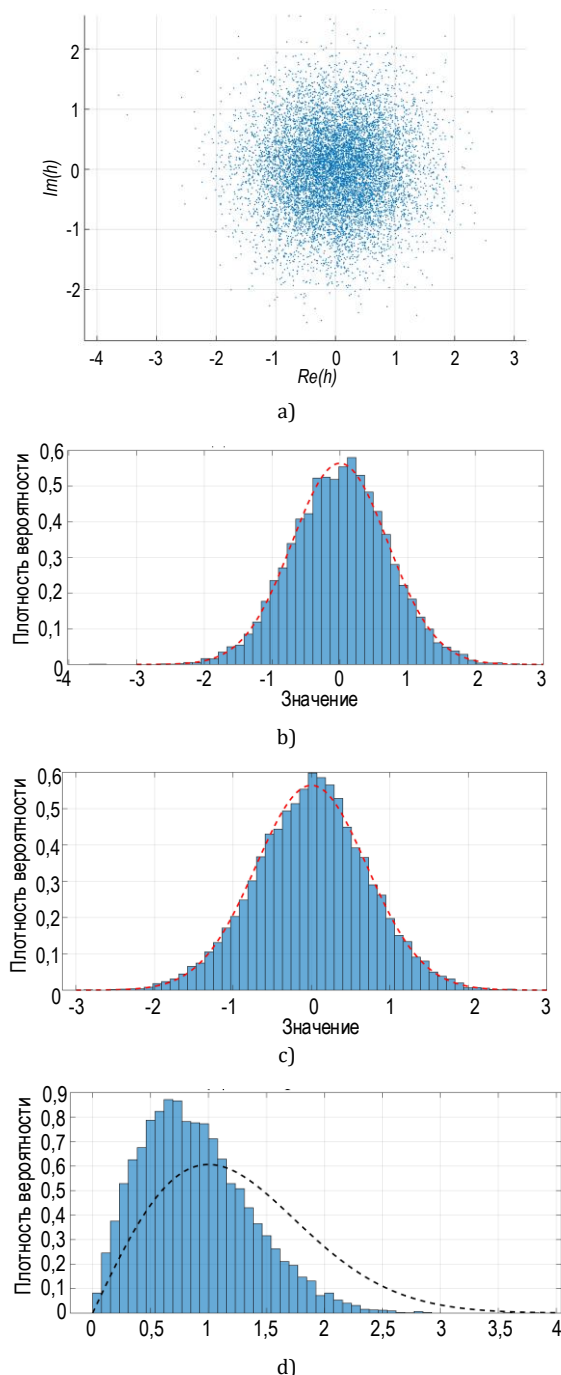


Рис. 1. Распределение значений коэффициентов передачи каналов h_i : а) комплексное распределение h_i ; б) действительная часть h_i ; в) мнимая часть h_i ; д) распределение Рэлея

Fig. 1. Distribution of Channel Transfer Coefficient Values h_i : а) Complex Distribution; б) Real Part; в) Imaginary Part; д) Rayleigh Distribution

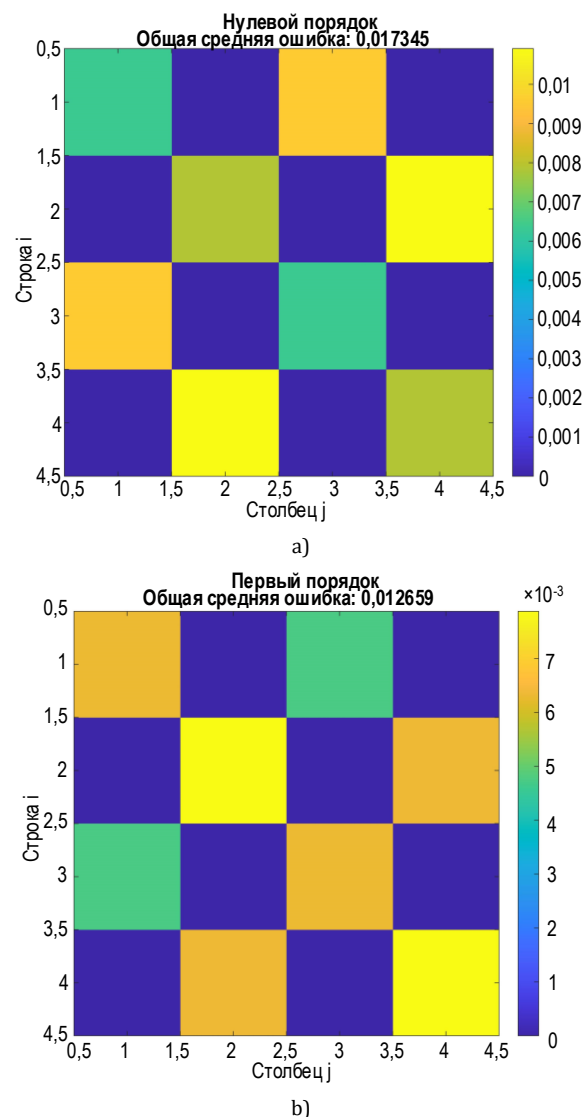


Рис. 2. Матрица ошибки между приближением нулевого (а) и первого (б) порядка и точным вычислением обратной матрицы

Fig. 2. Error Matrix between the Zero-Order (a) and First-Order (b) Approximation and the Exact Computation of the Inverse Matrix

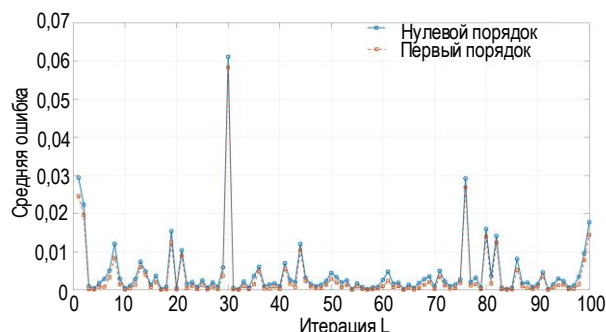


Рис. 3. Сравнение точности вычисления обратной матрицы при приближениях нулевого и первого порядка

Fig. 3. Comparison of the Accuracy of the Inverse Matrix Computation with Zero-Order and First-Order Approximations

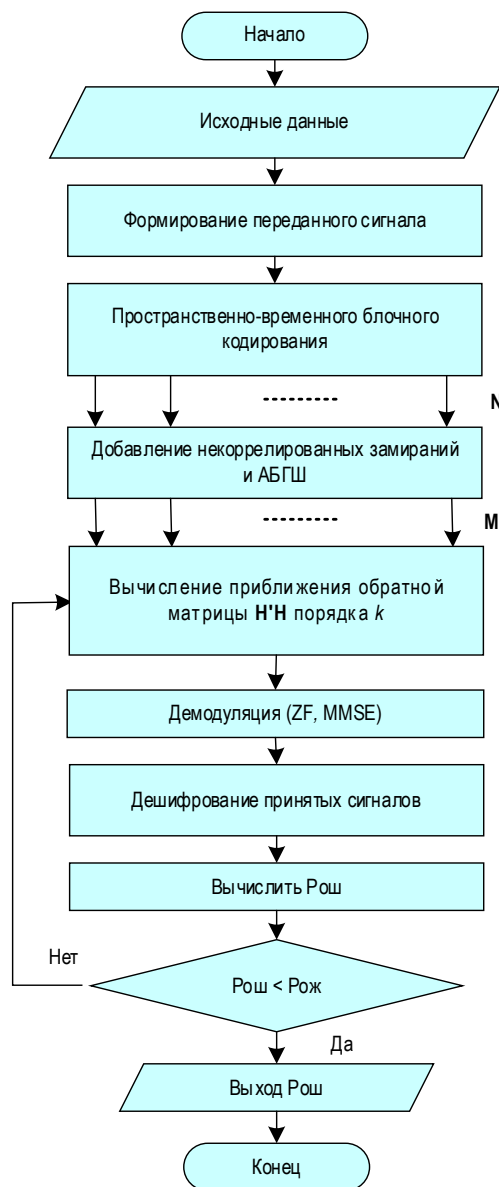


Рис. 4. Алгоритм предлагаемого метода демодуляции сигналов в системе MIMO

Fig. 4. Algorithm of the Proposed Signal Demodulation Method in the MIMO System

Основная идея предложенного алгоритма заключается в следующем: после обработки принятых сигналов от канала связи для вычисления матрицы $\mathbf{H}'\mathbf{H}$, применяется метод приближенного вычисления обратной матрицы, чтобы найти $(\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}$ порядка ноль ($k=0$). Результат вычисления $(\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}$ используется для демодуляции принятых сигналов с применением алгоритмов ZF, MMSE, после которых происходит дешифровка принятых сигналов с вычислением вероятности ошибки на каждом бите данных (Рош).

Затем полученное значение вероятности ошибки Рош сравнивается с ожидаемым значением Рож, которое, как правило, задается заранее (обычно $\text{Рож} = 10^{-5} - 10^{-6}$). Если полученное значение

Рош соответствует требованию, алгоритм завершает вычисления обратной матрицы $(\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}$ порядка ноль. В противном случае увеличивается значение k до $k=1$ и повторяются процессы, как для $k=0$. На основе экспериментальных данных (которые будут представлены позже) было установлено, что значение Рош, полученное при применении приближения порядка $k=1$, не отличается значительно от значения Рош, полученного при точном вычислении обратной матрицы. Поэтому в предложенном алгоритме будет вычисляться обратная матрица с максимальным порядком, равным единице.

Результаты моделирования

Для оценки эффективности рассматриваемых методов было проведено численное моделирование в следующих условиях. Информационный сигнал без канального кодирования модулировался с использованием квадратурной фазовой манипуляции QPSK. Передача осуществлялась через канал с многолучевым распространением и рэлеевскими замираниями. Параметры канала были заданы следующим образом: разброс временных задержек многолучевых компонент находился в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-6} с, а максимальный доплеровский сдвиг частоты составлял 100 Гц. На рисунке 5 представлены результаты сравнения помехоустойчивости методов демодуляции для системы MIMO с применением различных схем пространственно-временного кодирования.

Из представленных результатов (см. рисунок 5) можно сделать следующие выводы.

Во-первых, методы кодирования с ортогональной или квазиортогональной структурой, такие как OSTBC и QOSTBC, обеспечивают высокую эффективность в условиях сильных помех (низкое отношение сигнал/шум), несмотря на низкую скорость кодирования $R \leq 1$. При хорошем качестве канала передачи, а также в системах, предъявляющих высокие требования к скорости передачи данных, целесообразно применять методы STBC с повышенной скоростью кодирования ($R > 1$).

Во-вторых, наилучшими характеристиками среди рассмотренных методов демодуляции обладает метод ML, особенно в случае использования неортогональных методов кодирования STBC. Однако из-за высокой вычислительной сложности этот метод подходит только для систем с небольшим количеством передающих антенн, а также при использовании методов модуляции с низким порядком.

В-третьих, метод MMSE демонстрирует более высокую эффективность по сравнению с методом ZF, хотя при использовании кодирования OSTBC и QOSTBC это преимущество выражено менее явно.

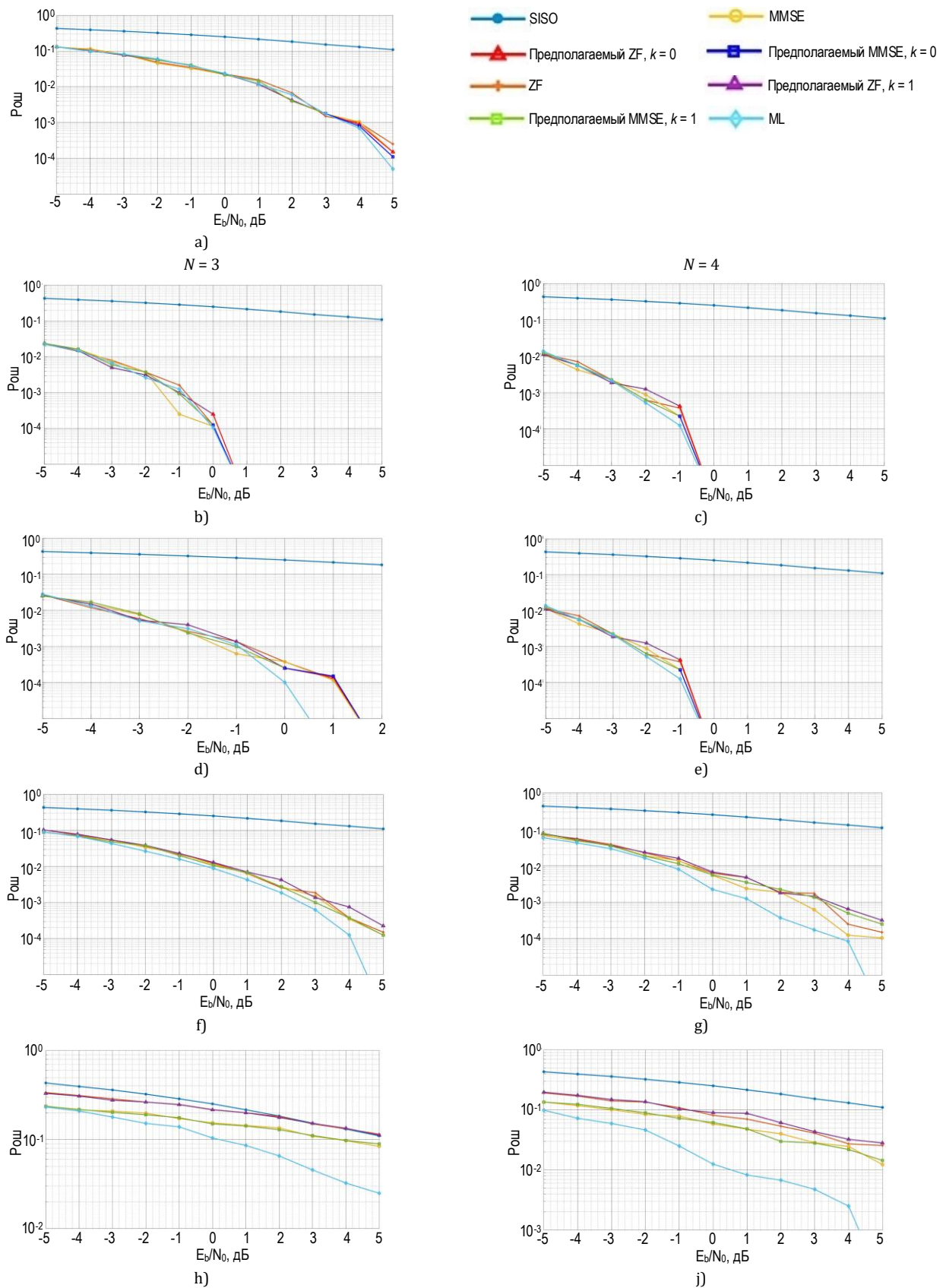


Рис. 5. Сравнение эффективности методов демодуляции сигналов системы MIMO с применением схемы Аламути (а), OSTBC при скорости передачи $R = 1/2$ (b, c) и $R = 3/4$ (d, e), QOSTBC (f, g) и STBC при скорости передачи $R = 2$ (h, j)

Fig. 5. Performance Comparison of Demodulation Methods for a MIMO System Using the Alamouti Scheme (a), OSTBC at a Transmission Rate $R = 1/2$ (b, c) and $R = 3/4$ (d, e), QOSTBC (f, g), and STBC at a Transmission Rate $R = 2$ (h, j)

В-четвертых, предлагаемый алгоритм, направленный на снижение вычислительной сложности для методов ZF и MMSE, доказал свою эффективность, поскольку обеспечивает сопоставимую производительность по сравнению с точными реализациями этих методов, при этом значительно снижая объем вычислений при обработке сигналов.

По сравнению с классическими системами связи SISO, технологии MIMO обеспечивают существенное повышение надежности передачи данных и / или пропускной способности канала. В то же время, реализация многоантенных конфигураций сопряжена со значительным ростом вычислительной сложности алгоритмов обработки сигналов на приемной стороне.

Заключение

В работе рассмотрены методы пространственно-временного кодирования в системах MIMO. Представлены различные подходы к построению ПВКМ, направленные на максимизацию ортогональности методов OSTBC; на повышение скорости кодирования за счет утраты свойства ортогональности, как в случае применения методов STBC; а также методы, балансирующие между этими двумя критериями, такие как методы QOSTBC. Кроме того, в работе предложен алгоритм снижения вычислительной сложности существующих методов демодуляции сигналов ZF и MMSE в MIMO системах, основанный на применении аппроксимации обратной матрицы. Полученные результаты показывают, что предложенный алгоритм позволяет существенно сократить вычислительные затраты при сохранении высокой эффективности обработки сигнала.

Список источников

1. Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 352 с. EDN:SDSMUX
2. Быховский М.А. Гиперфазовая модуляция – оптимальный метод передачи сообщений в гауссовских каналах связи. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. 310 с. EDN:IPVDXR
3. Лукьянчик Я.И., Левенец А.В., Чье Е.У. Модель системы передачи данных с обратной связью и адаптивным выбором кодирования по состоянию канала связи // Информационные технологии XXI века. 2015. С. 506–513. EDN:UDRXTN
4. Кульбида В.А. Способы помехоустойчивого кодирования и декодирования для построения систем связи с адаптацией этих способов к состоянию канала // Техника радиосвязи. 2006. № 11. С. 40–51. EDN:LTWRRX
5. Каменцев О.К. Алгоритмы обработки спектрально-эффективных сигналов с частотным мультиплексированием. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Воронежский государственный университет, 2024. 131 с. EDN:JSKECY
6. Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Исследование характеристик OFDM-систем радиосвязи с адаптивным отключением поднесущих // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2007. № 5. С. 43–49. EDN:JXCIBV
7. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Применение технологии MIMO в современных системах беспроводной связи разных поколений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 4. С. 4–12. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-4-4-12. EDN:FPZEGW
8. Панкратов Д.Ю., Пахомова А.В. Применение технологии MIMO для улучшения характеристик физического уровня беспроводных сетей Wi-Fi // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 3. С. 55–61. DOI:10.36724/2409-5419-2024-16-3-55-61. EDN:UEAIEZ
9. Петров В.П., Якушев И.Ю. Современные технологии в системе MIMO // Вестник СибГУТИ. 2019. № 2. С. 94–108. EDN:HKRBVT
10. Комаров М.И., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г., Чуманов А.Е. Помехоустойчивость и вычислительная сложность алгоритмов демодуляции для систем MIMO с разным числом антенн // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2022. Т. 12. № 1. С. 39–47. EDN:ENKGOL
11. Крейнделин В.Б., Смирнов А.Э., Бен Режеб Т.Б.К. Эффективность методов обработки сигналов в системах MU-MIMO высоких порядков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 12. С. 24–30. EDN:XKNRRJ
12. Alamouti S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1998. Vol. 16. Iss. 8. PP. 1451–1458. DOI:10.1109/49.730453
13. Tarokh V., Jafarkhani H., Calderbank R. Space-time block coding for wireless communications: performance results // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1999. Vol. 17. Iss. 3. PP. 451–460. DOI:10.1109/49.753730
14. Ganesan G., Stoica P. Space-time block codes: A maximum SNR approach // IEEE Transactions on Information Theory. 2001. Vol. 47. Iss. 4. PP. 1650–1656. DOI:10.1109/18.923754
15. Arti M.K. OSTBC Transmission in Large MIMO Systems // IEEE Communications Letters. 2016. Vol. 20. Iss. 11. PP. 2308–2311. DOI:10.1109/LCOMM.2016.2597229
16. Ozbek B., Ruyet D., Bellanger M. Non-Orthogonal Space-Time Block Coding Design for 3 Transmit Antennas. 2003. URL: <https://easytp.cnam.fr/leruyet/Publications/gretsi2003.pdf> (Accessed 25.06.2025)
17. Dama Y., Abd-Alhameed R., Ghazaany T., Zhu S. A New Approach for OSTBC and QOSTBC // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 67. Iss. 6. PP. 45–48. DOI:10.5120/11403-6719
18. Wu C., Yang S., Xiao Y., Xiao M. Quasi-Orthogonal Space-Time Block Coded Spatial Modulation // IEEE Transactions on Communications. 2022. Vol. 70. Iss. 12. PP. 7872–7885. DOI:10.1109/TCOMM.2022.3216805. EDN:JFXAGD
19. Seema S., Arti M.K., Reddy B. Data Detection in Large MIMO System with Reduced Computational Complexity for

QOSTBC Transmission // Proceedings of the 3rd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE, Ghaziabad, India, 23–24 November 2023). IEEE, 2023. PP. 46–50. DOI:10.1109/AECE59614.2023.10428602

20. Jung Y.-H., Nam S.H., Chung J., Kim Y., Ko K., Chae C.-B., et al. Enhancement of Rate 2 STC with Antenna Grouping // IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. 2004. URL: https://www.ieee802.org/16/tge/contrib/C80216e-04_555.pdf (Accessed 25.06.2025)

21. Chae C.-B., Roh W., Yun S.-R., Ko K., Jeong H., Oh J.T., et al. Enhancement of STC with Antenna Grouping // IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. 2004. URL: https://www.ieee802.org/16/tge/contrib/C80216e-04_554r4.pdf (Accessed 25.06.2025)

22. Djemamar Y., Ibnyaich S., Zeroual A. Space-Time Block Coding Techniques for MIMO 2×2 System using Walsh-Hadamard Codes // Journal of International Conference on Electrical and Information Technologies. 2022. PP. 1–7. DOI:10.6109/jicce.2022.20.1.1

23. Mecklenbräuker C.F., Rupp M. Generalized Alamouti Codes for Trading Quality of Service Against Data Rate in MIMO UMTS // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2004. PP. 662–675. DOI:10.1155/S1110865704310061

24. Быховский М.А. Пространственно-временное кодирование в системах MISO // Электросвязь. 2020. № 1. С. 67–75. DOI:10.34832/ELSV.2020.2.1.010. EDN:LARTEL

25. Смирнов А.Э. Снижение порядка вычислительной сложности алгоритмов детектирования в многоантенных системах за счёт использования алгоритмов быстрого умножения матриц // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2015. Т. 15. № 5. С. 267–270. EDN:VOUGPX

26. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Вычислительная сложность алгоритмов демодуляции систем MIMO с большим числом антенн // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. Т. 11. № 1. С. 11–20. EDN:QTSOZP

27. Khrapov P.V., Volkov N.S. Comparative analysis of Jacobi and Gauss-Seidel iterative methods // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Vol. 12. Iss. 2. PP. 23–34. DOI:10.48550/arXiv.2307.09809. EDN:INYTHE

28. Björck, Å. Numerical Methods in Matrix Computations. Cham: Springer, 2015. 551 p. DOI:10.1007/978-3-319-05089-8

29. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. John Wiley & Sons, 2010. 439 p. DOI:10.1002/9780470825631. EDN:SRQIDH

References

1. Vargauzin V.A., Tsikin I.A. *Methods for Improving Energy and Spectral Efficiency of Digital Radio Communication*. St. Petersburg: BHV-Peterburg Publ.; 2013. 352 p. (in Russ.) EDN:SDSMUX

2. Bykhovskii M. Hyperphase Modulation – the Optimal Method of Message Transmission in the Gaussian Communication Channels. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2018. 310 p. (in Russ.) EDN:IPVDXR

3. Lukyanchik Ya.I., Levenets A.V., Chye E.U. Model of a Data Transmission System with Feedback and Adaptive Coding Selection Based on Channel State. *Information Technologies of the 21st Century*. 2015:506–513. (in Russ.) EDN:UDRXTX

4. Kulbida V.A. Methods of Error-Resistant Coding and Decoding for Building Communication Systems with Adaptation to Channel State. *Tekhnika radiosvyazi*. 2006;11:40–51. (in Russ.) EDN:LTWRRX

5. Kamentsev O.K. *Algorithms for Processing Spectrally Efficient Signals with Frequency Multiplexing*. Ph.D. Thesis. Voronezh State University Publ.; 2024. 131 p. (in Russ.) EDN:JSKECY

6. Maltsev A.A., Rubtsov A.E. Investigation of Performance of OFDM Wireless Communication Systems with Adaptive Subcarrier Puncturing. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2007;5:43–49. (in Russ.) EDN:JXCIBV

7. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Pankratov D.Yu. Application of MIMO Technology in Modern Wireless Communication Systems of Different Generations. *T-Comm*. 2021;15(4):4–12. (in Russ.) DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-4-4-12. EDN:FPZEGW

8. Pankratov D.Yu., Pakhomova A.V. Application of MIMO Technology to Improve Physical Layer Characteristics of Wi-Fi Wireless Networks. *H&ES Research*. 2024;16(3):55–61. (in Russ.) DOI:10.36724/2409-5419-2024-16-3-55-61. EDN:UEAIEZ

9. Petrov V.P., Yakushev I.Yu. Modern Technologies in MIMO Systems. *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science*. 2019;2:94–108. (in Russ.) EDN:HKRBBT

10. Komarov M.I., Pankratov D.Yu., Stepanova A.G., Chumanov A.E. Noise Immunity and Computational Complexity of Demodulation Algorithms for MIMO Systems with Different Numbers of Antennas. *Digital Signal Processing and Its Applications*. 2022;12(1):39–47. (in Russ.) EDN:ENKGOL

11. Kreindelin V.B., Smirnov A.E., Ben Rezheb T.B.K. Efficiency of Signal Processing Methods in High-Order MU-MIMO Systems. *T-Comm*. 2016;10(12):24–30. (in Russ.) EDN:XKNRRJ

12. Alamouti S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1998;16(8):1451–1458. DOI:10.1109/49.730453

13. Tarokh V., Jafarkhani H., Calderbank R. Space-time block coding for wireless communications: performance results. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1999;17(3):451–460. DOI:10.1109/49.753730

14. Ganesan G., Stoica P. Space-time block codes: A maximum SNR approach. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2001;47(4):1650–1656. DOI:10.1109/18.923754

15. Arti M.K. OSTBC Transmission in Large MIMO Systems. *IEEE Communications Letters*. 2016;20(11):2308–2311. DOI:10.1109/LCOMM.2016.2597229

16. Ozbek B., Ruyet D., Bellanger M. *Non-Orthogonal Space-Time Block Coding Design for 3 Transmit Antennas*. 2003. URL: <https://easytp.cnam.fr/leruyet/Publications/greetsi2003.pdf> [Accessed 25.06.2025]

17. Dama Y., Abd-Alhameed R., Ghazaany T., Zhu S. A new approach for OSTBC and QOSTBC. *International Journal of*

Computer Applications. 2013;67(6):45–48. DOI:10.5120/11403-6719

18. Wu C., Yang S., Xiao Y., Xiao M. Quasi-Orthogonal Space-Time Block Coded Spatial Modulation. *IEEE Transactions on Communications*. 2022;70(12):7872–7885. DOI:10.1109/TCOMM.2022.3216805. EDN:JFXAGD

19. Seema S., Arti M.K., Reddy B. Data Detection in Large MIMO System with Reduced Computational Complexity for QOSTBC Transmission. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering, AECE, 23–24 November 2023, Ghaziabad, India*. IEEE; 2023. p.46–50. DOI:10.1109/AECE59614.2023.10428602

20. Jung Y.-H., Nam S.H., Chung J., Kim Y., Ko K., Chae C.-B., et al. *Enhancement of Rate 2 STC with Antenna Grouping*. 2004. URL: https://www.ieee802.org/16/tge/contrib/C80216e-04_555.pdf [Accessed 25.06.2025]

21. Chae C.-B., Roh W., Yun S.-R., Ko K., Jeong H., Oh J.T., et al. *Enhancement of STC with Antenna Grouping*. 2004. URL: https://www.ieee802.org/16/tge/contrib/C80216e-04_554r4.pdf [Accessed 25.06.2025]

22. Djemamar Y., Ibnyaich S., Zeroual A. Space-Time Block Coding Techniques for MIMO 2×2 System using Walsh-Hadamard Codes. *Journal of International Conference on Electrical and Information Technologies*. 2022:1–7. DOI:10.6109/jicce.2022.20.1.1

23. Mecklenbräuker C.F., Rupp M. Generalized Alamouti Codes for Trading Quality of Service Against Data Rate in MIMO UMTS. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2004:662–675. DOI:10.1155/S1110865704310061

24. Bykhovskii M.A. Space-Time Coding In Miso Systems. *Elektrosvyaz*. 2020;1:67–75. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2020.2.1.010. EDN:LARTEL

25. Smirnov A.E. Reducing the Computational Complexity of Detection Algorithms in Multi-Antenna Systems Using Fast Matrix Multiplication Algorithms. *Fundamentalnye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*. 2015;15(5):267–270. (in Russ.) EDN:VOUGPX

26. Pankratov D.Yu., Stepanova A.G. Computational Complexity of Demodulation Algorithms for MIMO Systems with a Large Number of Antennas. *Digital Signal Processing and Its Applications*. 2021;11(1):11–20. (in Russ.) EDN:QTSOZP

27. Khrapov P.V., Volkov N.S. Comparative analysis of Jacobi and Gauss-Seidel iterative methods. *International Journal of Open Information Technologies*. 2024;12(2):23–34. DOI:10.48550/arXiv.2307.09809. EDN:INYTHE

28. Björck Å. *Numerical Methods in Matrix Computations*. Cham: Springer; 2015. 551 p. DOI:10.1007/978-3-319-05089-8

29. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. John Wiley & Sons; 2010. 439 p. DOI:10.1002/9780470825631. EDN:SRQIDH

Статья поступила в редакцию 19.05.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 10.06.2025.

The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 03.06.2025; accepted for publication 10.06.2025.

Информация об авторах:

**ФАМ
Конг Куен**

аспирант кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0005-5305-3872>

**ГЛУШАНКОВ
Евгений Иванович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-8842-7903>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.