

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-69-80>

EDN:KMMPRR



Методы пространственно-временного кодирования сигналов в нестационарных частотно-селективных каналах MIMO-OFDM систем связи

Ван Донг Нгием, ngiem.v@phystech.edu

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 117303, Российская Федерация

Аннотация

В работе исследуются методы пространственно-временного кодирования сигналов в системах MIMO-OFDM при передаче в нестационарных частотно-селективных каналах. Рассмотрены ограничения традиционных подходов (STBC, SFBC) при высоких уровнях доплеровского сдвига и частотной избирательности. **Актуальность исследования** обусловлена необходимостью повышения спектральной эффективности и устойчивости беспроводных систем связи к межсимвольным помехам и доплеровским искажениям.

Используемые методы. В статье предложена структура комбинированного алгоритма пространственного кодирования WHSTBC-CC, основанного на сопряженном подавлении и преобразовании Уолша – Адамара. Построены математические модели передающих и приемных сигналов, учитывающие влияние искажений канала и аддитивного белого гауссова шума. Для анализа эффективности применены методы моделирования с учетом нормированных значений доплеровского сдвига и коэффициентов временной и частотной корреляции.

Результаты. Показано, что использование WHSTBC-CC обеспечивает повышение устойчивости передачи и снижение вероятности ошибок при $fdT \leq 0,01$. Коэффициент энергетического выигрыша метода составляет 5–12 дБ по сравнению с классическим STBC и практически не зависит от частотной избирательности канала. Разработанная в работе модификация пространственного кодирования с использованием преобразования Уолша – Адамара и алгоритма сопряженного подавления позволяет частично компенсировать указанные недостатки, повышая устойчивость системы и обеспечивая выигрыш по энергии до 12 дБ по сравнению с классическим STBC. Экспериментальные измерения на подвижной SDR-платформе подтвердили работоспособность предложенного подхода в условиях реальной радиосреды, включая сценарии с прямой видимостью и без нее.

Новизна работы заключается в разработке алгоритма адаптивного пространственного кодирования, интегрирующего различные схемы (STBC, SFBC) в зависимости от параметров канала.


Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации систем MIMO-OFDM для сетей мобильной связи и широкополосного доступа, а также в специализированных радиосетях, функционирующих в условиях высокой нестационарности и воздействия средств радиоэлектронного подавления.

Ключевые слова: пространственно-временное кодирование, STBC, SFBC, MIMO-OFDM, доплеровский сдвиг, частотно-селективный канал, нестационарность, спектральная эффективность, сопряженное подавление, преобразование Уолша – Адамара

Ссылка для цитирования: Нгием В.Д. Методы пространственно-временного кодирования сигналов в нестационарных частотно-селективных каналах MIMO-OFDM систем связи // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 1. С. 69–80. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-69-80. EDN:KMMPRR

Original research
<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-1-69-80>
EDN:KMMPRR

Methods for Spatiotemporal Signal Coding in Non-Stationary Frequency-Selective MIMO-OFDM Channels

 Van Dong Nghiem, ngiem.v@phystech.edu

Moscow Institute of Physics and Technology,
Moscow, 117303, Russian Federation

Annotation

The article investigates methods of spatio-temporal encoding of signals in MIMO-OFDM systems during transmission in non-stationary frequency-selective channels. The limitations of traditional approaches (STBC, SFBC) at high levels of Doppler shift and frequency selection are considered. The **relevance** of the study is due to the need to increase the spectral efficiency and stability of wireless communication systems to intersymbol interference and Doppler distortion.

Methods used. The article proposes the structure of a combined spatial encoding algorithm WHSTBC-CC based on combined suppression and Walsh-Hadamard transformation. Mathematical models of transmitting and receiving signals are constructed, taking into account the influence of channel distortions and additive white Gaussian noise. To analyze the effectiveness, modeling methods were applied taking into account the normalized values of the Doppler shift and the coefficients of time and frequency correlation.

Results. It is shown that the use of WHSTBC-CC provides an increase in transmission stability and a reduction in the probability of errors at $fdT < 0.01$. The energy gain coefficient of the method is 5-12 dB compared with the classical STBC and is practically independent of the frequency abundance of the channel. The modification of spatial coding developed in the work using the Walsh-Hadamard transform and the conjugate suppression algorithm partially compensates for these disadvantages, increasing the stability of the system and providing an energy gain of up to 12 dB compared with the classical STBC. Experimental measurements on a mobile SDR platform have confirmed the operability of the proposed approach in a real radio environment, including scenarios with and without direct visibility.

The novelty of the work lies in the development of an adaptive spatial coding algorithm that integrates various schemes (STBC, SFBC) depending on the channel parameters.

Practical significance. The results obtained can be used in the design and optimization of MIMO-OFDM systems for mobile communications and broadband access networks, as well as in specialized radio networks operating in conditions of high instability and exposure to electronic jamming.

Keywords: space-time coding, STBC, SFBC, MIMO-OFDM, Doppler shift, frequency-selective channel, nonstationarity, spectral efficiency, conjugate suppression, Walsh-Hadamard transformation

For citation: Nghiem V.D. Methods for Spatiotemporal Signal Coding in Non-Stationary Frequency-Selective MIMO-OFDM Channels. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(1): 69–80. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-1-69-80. EDN:KMMPRR

Введение

В современном информационном мире наблюдается тенденция к развитию систем беспроводной связи, в частности сетей мобильной связи и широкополосного доступа [1]. Одной из важных задач в области систем беспроводной связи является значительное увеличение скорости передачи данных

и повышение качества обслуживания пользователей (снижение вероятности ошибок при передаче информации). Традиционные способы решения такой задачи (расширение полосы частот или увеличение мощности излучения) почти исчерпали себя из-за высокой стоимости полос частот и требований биологической защиты окружающей среды.

Одновременное использование технологий мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM, аббр. от англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) и многоантенной приемо-передачи (MIMO, аббр. от англ. Multiple-Input and Multiple-Output) может частично решить эту проблему. Технология OFDM, преобразуя широкополосный частотно-избирательный канал в набор узкополосных подканалов с преимущественно амплитудными замираниями, обеспечивает существенное снижение межсимвольных помех, а использование многопозиционных сигналов для модуляции каждой поднесущей OFDM обеспечивает высокую спектральную эффективность. В то же время ортогональность поднесущих OFDM может нарушаться из-за доплеровского сдвига частот. Применение технологии MIMO в каналах с замиранием амплитуды позволяет приблизить ее помехозащищенность к потенциальной помехозащищенности гауссова канала.

В литературе рассматривается одновременное применение ортогонального частотного мультиплексирования и многоантенных систем. Исследование методов пространственного кодирования [2, 3] получило дальнейшее развитие в научных публикациях [4]. В частотно-селективных каналах метод пространственно-временного блочного кодирования (STBC, аббр. от англ. Space-Time Block Coding) [5] обладает более высокой помехоустойчивостью по сравнению с пространственно-частотным блочным кодированием (SFBC, аббр. от англ. Space-Frequency Block Coding) [6], однако характеризуется высокой чувствительностью к нестационарным изменениям параметров канала. Напротив, метод SFBC демонстрирует эффективность при высокой нестационарности, но чувствителен к частотной избирательности.

Также по данным В.И. Солодовник, Н.И. Науменко [6], для повышения устойчивости метода SFBC к нестационарности канала целесообразно использовать алгоритм сопряженного подавления (CC, аббр. от англ. Conjugate Cancellation) со структурным усовершенствованием на основе преобразования Уолша – Адамара (WHT, аббр. от англ. Walsh – Hadamard Transform,) символов входной информации кодировщика Аламути – в рамках схемы WHSTBC-CC (аббр. от англ. Walsh-Hadamard Space-Time Block Coding with Conjugate Cancellation). Авторы указывают, что для повышения помехоустойчивости метода SFBC применяются методы коррекции амплитудно-частотной характеристики, а также метод блочного кодирования, который в зависимости от числа модулированных сигналов обладает полной либо частичной инвариантностью к частотной избирательности канала.

Адаптивное (комбинированное) применение методов STBC и SFBC (ST-SF) недостаточно эффективно в условиях каналов с одновременным проявлением выраженной частотной избирательности и высокой нестационарности [7].

Постановка проблемы

Для совершенствования метода адаптивного пространственного кодирования сигналов на основе комбинированного учета помехозащищенности канала, нормированного значения доплеровского сдвига частот, коэффициентов временной и частотной корреляции будут проанализированы методы пространственного кодирования сигналов в нестационарных частотно-селективных каналах беспроводных систем связи MIMO.

Цель статьи

Анализ и совершенствование методов пространственно-временного кодирования сигналов в условиях нестационарных частотно-селективных каналов в системах беспроводной связи MIMO-OFDM с целью повышения спектральной эффективности и устойчивости к доплеровским искажениям и межсимвольным помехам.

Изложение основного материала

Согласно методу STBC, если рассматривается двухантенная система, входная последовательность элементов сигнального ансамбля \mathbf{d} [8]:

$$\mathbf{d} = [d_0, d_1, \dots, d_{N-1}, d_N, d_{N+1}, \dots, d_{2N-1}], \quad (1)$$

где N – количество поднесущих OFDM, представлено в виде двух транспонированных векторов:

$$\mathbf{d}^{(1)} = [d_0, d_1, \dots, d_{N-2}, d_{N-1}]^T \quad (2)$$

и

$$\mathbf{d}^{(2)} = [d_N, d_{N+1}, \dots, d_{2N-2}, d_{2N-1}]^T. \quad (3)$$

Согласно алгоритму Аламути, в момент времени t_1 передаются векторы $\mathbf{d}^{(1)}$ и $\mathbf{d}^{(2)}$, а в момент времени t_2 – их комплексно-сопряженные копии $\mathbf{d}^{*(1)}$ и $\mathbf{d}^{*(2)}$.

Полученные векторы сигналов r_1 и r_2 после быстрого преобразования Фурье (БПФ) в указанные моменты времени t_1 и t_2 соответственно описываются выражениями:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{H}^{(1)}\mathbf{d}^{(1)} + \mathbf{H}^{(2)}\mathbf{d}^{(2)} + \boldsymbol{\xi}^{(1)} \quad (4)$$

и

$$\mathbf{r}_2 = -\mathbf{H}^{(1)}\mathbf{d}^{*(2)} + \mathbf{H}^{(2)}\mathbf{d}^{*(1)} + \boldsymbol{\xi}^{(2)}. \quad (5)$$

Под «векторами сигналов» понимаются векторы-столбцы комплексных чисел, содержащие спектральные отсчеты (коэффициенты) OFDM-символов на приемной стороне после БПФ. То есть каждый элемент такого вектора – это комплексная амплитуда сигнала на конкретной поднесущей OFDM. Векторы $\mathbf{d}^{(1)}$ и $\mathbf{d}^{(2)}$ – это сформированные на

передающей стороне пакеты данных для первой и второй антенны, полученные разбиением исходной последовательности модулированных символов. Векторы r_1 и r_2 – это соответствующие принятые версии сигналов (искаженные каналом и шумом) на входе приемника после выполнения БПФ.

Диагональная матрица с элементами, определяющими частотную характеристику k -го подканала i -й антенны, можно записать как:

$$\mathbf{H}^{(i)} = \text{diag}[\mathbf{H}_0^{(i)} \mathbf{H}_1^{(i)} \dots \mathbf{H}_k^{(i)}], i \in \overline{1,2}. \quad (6)$$

Вектор значений аддитивного белого гауссова шума вычисляется с помощью формулы:

$$\boldsymbol{\xi}^{(i)} = [\xi_0 \xi_1 \dots \xi_{N-1}]^T.$$

В результате сложения дифференциально взвешенных сигналов каждого канала (MRC, аббр. от англ. Maximal Ratio Combining) выходные сигналы декодера STBC $\mathbf{z}^{(1)}$ и $\mathbf{z}^{(2)}$ генерируют оценки передаваемых символов на каждой поднесущей OFDM.

Выходные сигналы декодера STBC определяются с помощью следующих выражений:

$$\mathbf{z}^{(1)} = \mathbf{r}_1 \mathbf{H}^{*(1)} - \mathbf{r}_2 \mathbf{H}^{*(1)} = (\bar{\mathbf{H}}^{(1)} - \bar{\mathbf{H}}^{(2)}) \mathbf{d}^{(1)} + \boldsymbol{\xi}^{(1)} \quad (7)$$

$$\mathbf{z}^{(2)} = \mathbf{r}_1 \mathbf{H}^{*(2)} - \mathbf{r}_2 \mathbf{H}^{*(2)} = (\bar{\mathbf{H}}^{(1)} - \bar{\mathbf{H}}^{(2)}) \mathbf{d}^{(2)} + \boldsymbol{\xi}^{(2)} \quad (8)$$

Результаты исследований свидетельствуют о том, что метод STBC достаточно эффективен при условии $f_d T \leq 0,01..0,03$, где $f_d T$ – нормализованное значение доплеровского сдвига; T – длительность OFDM-символа; f_d – максимальная доплеровская частота, связанная с относительным движением передатчика и приемника.

Метод STBC с повышенной устойчивостью к нестационарности одновременно реализует алгоритм сопряженной компенсации интерференции между несущими с расширенным разнесением информационной последовательности символов $\{\mathbf{d}\}$ за счет ее преобразования Уолша – Адамара:

$$\mathbf{d}^{(W_i)} = \mathbf{W}_N \mathbf{d}^{(i)}, \quad (9)$$

где $\mathbf{d}^{(W_i)}$ – вектор входной последовательности символов после преобразования Уолша – Адамара; \mathbf{W}_N – единичная ортогональная $N \times N$ матрица Уолша – Адамара.

Векторы принимаемого сигнала после БПФ выглядят следующим образом:

$$\mathbf{r}_1^{(1)} = H^{(1)} \mathbf{d}^{(W_1)} + \boldsymbol{\xi}_1^{(1)}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1^{(2)} &= \text{FFT}\{[h^{(2)} \otimes (\text{IFFT}(\mathbf{d}^{(W_2)}))^*]^*\} = \\ &= H^{*(2)} \mathbf{d}^{(W_2)} + \boldsymbol{\xi}_2^{(2)}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_2^{(2)} &= \text{FFT}\{[h^{(2)} \otimes (\text{IFFT}(\mathbf{d}^{(W_1)}))^*]^*\} \\ &= H^{*(2)} \mathbf{d}^{(W_1)} + \boldsymbol{\xi}_2^{(2)}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\mathbf{r}_t^{(i)}$ – вектор сигналов, принимаемых от i -й антенны $i = \overline{1,2}$, в t -й момент времени; $t = \overline{1,2}$, \otimes – круговая свертка; FFT – БПФ; IFFT – обратное преобразование Уолша – Адамара (ПУА).

После преобразования Уолша – Адамара \mathbf{W}^{-1} происходит когерентное сложение векторов сигнала:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}^{(1)} &= \mathbf{W}_N^{-1}(\mathbf{r}_1^{(1)} \mathbf{H}^{*(1)} + \mathbf{r}_1^{*(2)} \mathbf{H}^{(2)}) = \\ &= (\bar{\mathbf{H}}^{(1)} + \bar{\mathbf{H}}^{(2)}) \mathbf{d}^{(1)} + \boldsymbol{\eta}^{(1)} \end{aligned} \quad (13)$$

и

$$\begin{aligned} \mathbf{z}^{(2)} &= \mathbf{W}_N^{-1}(\mathbf{r}_2^{*(1)} \mathbf{H}^{(1)} + \mathbf{r}_1^{(2)} (\mathbf{H}^{*(2)})^*) = \\ &= (\bar{\mathbf{H}}^{(1)} + \bar{\mathbf{H}}^{(2)}) \mathbf{d}^{(2)} + \boldsymbol{\eta}^{(2)}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\boldsymbol{\eta}^{(1)}$ и $\boldsymbol{\eta}^{(2)}$ – вектор аддитивных значений белого гауссова шума после преобразования Уолша – Адамара:

$$\boldsymbol{\eta}^{(i)} = \mathbf{W}^{-1} \boldsymbol{\xi}^{(i)}, \quad (15)$$

на основании чего детектор максимального правдоподобия (ML) оценивает последовательность передаваемых информационных символов.

Коэффициент усиления по энергии метода составляет 5..12 дБ по сравнению с STBC и фактически не зависит от избирательности канала.

Согласно методу SFBC [9], последовательность входной информации:

$$\mathbf{d} = [\mathbf{d}_0, \mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_{N-1}, \mathbf{d}_N, \mathbf{d}_{N+1}, \dots, \mathbf{d}_{2N-1}], \quad (16)$$

где n – серийный номер поднесущей OFDM и равен $n = 0..N-1$, представляется в виде следующих векторов:

$$\mathbf{d}^{(1)} = [\mathbf{d}_0 - \mathbf{d}_1^* \mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_3^* \dots \mathbf{d}_{N-2} - \mathbf{d}_{N-1}^*], \quad (17)$$

$$\mathbf{d}^{(2)} = [\mathbf{d}_1 - \mathbf{d}_0^* \mathbf{d}_3 - \mathbf{d}_2^* \dots \mathbf{d}_{N-1} - \mathbf{d}_{N-2}^*], \quad (18)$$

которые передаются одновременно двумя антеннами в течение одного OFDM-символа.

Вектор сигнала формируется на принимающей стороне:

$$\mathbf{r}_1^{(1)} = H^{(1)} \mathbf{d}^{(1)} + H^{(2)} \mathbf{d}^{(2)} + \boldsymbol{\xi}. \quad (19)$$

Учитывая, что $\mathbf{H}^{(i)}$ является диагональной матрицей, элементы каждого блока $\mathbf{G}_n, \mathbf{G}_{n+1}$ вектора (11) имеют вид:

$$\mathbf{G}_n = \mathbf{H}_n^{(1)} \mathbf{d}_n + \mathbf{H}_n^{(2)} \mathbf{d}_{n+1} + \boldsymbol{\xi}_n, \quad (20)$$

$$\mathbf{G}_{n+1} = \mathbf{H}_n^{(1)} \mathbf{d}^{(1)} + \mathbf{H}_{n+1}^{(2)} \mathbf{d}_{n+1}^* + \boldsymbol{\xi}_{n+1}. \quad (21)$$

В дальнейшем в пространственно-частотном декодере и ML-детекторе будут реализованы процедуры, аналогичные STBC.

Метод SFBC эффективен в каналах с умеренной селективностью ($\Delta F_k \geq 2\Delta f$, где ΔF_k – ширина полосы когерентности канала, Δf – ширина полосы подканала OFDM) и нестационарностью, изменяющейся в диапазоне значений $f_d T \in [0,05; 0,2]$. Метод

SFBC нуждается в совершенствовании за счет повышения устойчивости к неравномерности амплитудно-частотной характеристики канала. Однако ее коррекция, учитывая нестационарность канала и возможное увеличение шума, проблематична. Поэтому целесообразно совершенствовать SFBC на передающей стороне путем синтеза алгоритмов преобразования выходных сигналов пространственно-частотного блочного энкодера, обеспечивающих снижение чувствительности к частотной избирательности. Данный подход реализован в методе SFBC с повышенной устойчивостью к частотной селективности (\overline{SF}).

Метод SFBC обеспечивает преобразование частотно-селективного канала в канал с полностью или частично кусочно-плоской амплитудно-частотной характеристикой. Эффект достигается в зависимости от состава (ансамбля) сигналов, передаваемых на каждой поднесущей технологии OFDM. В основе метода лежит реализация следующего свойства: если определенная группа поднесущих OFDM предварительно кодируется преобразованием Уолша – Адамара, элементы которого равны по модулю, то каждая поднесущая в группе получает одинаковое мгновенное отношение сигнал / шум.

Пусть $\mathbf{d}^{(1)}$ и $\mathbf{d}^{(2)}$ – выходные векторы (10) и (11) кодировщика SFBC в технологии MIMO-OFDM 2×1 , которые подлежат преобразованию Уолша – Адамара:

$$\begin{aligned} c_n^{(i)} &= [c_n^{(i)} c_{n+1}^{(i)}] = \mathbf{W} \mathbf{d}_n^{(i)} = \\ &= \begin{cases} [\mathbf{d}_n - \mathbf{d}_{n+1}^* & \mathbf{d}_n - \mathbf{d}_{n+1}]^T, i = 1 \\ [\mathbf{d}_{n+1} + \mathbf{d}_n & \mathbf{d}_{n+1} - \mathbf{d}_n^*]^T, i = 2 \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

На основе приведенных формул (16–22), следует отметить, что метод SFBC на основе двоичной фазовой манипуляции обеспечивает практически оптимальное пространственно-временное и частотное разнесение в каналах с выраженной частотной и временной избирательностью. Указанный метод может быть эффективно применен в каналах радиосвязи сетей специального назначения, функционирующих в условиях воздействия средств радиоэлектронного подавления.

Таким образом, анализ современных методов пространственного кодирования сигналов показывает их высокую эффективность для отдельных типов каналов, отличающихся разными уровнями нестационарности и частотной избирательности. Однако ни один из них не может быть универсальным для обеспечения необходимой помехозащищенности беспроводных систем передачи в нестационарных частотно-селективных каналах с инвариантными по времени статистическими параметрами. Объективная сложность разработки универсаль-

ного метода пространственного кодирования заключается в противоречии между влиянием нестационарности и частотной избирательности на структурно-параметрическую оптимизацию технологии MIMO-OFDM. Поэтому для таких инвариантных по времени каналов со сложной статистической структурой, представляющих значительный практический интерес, целесообразно разработать метод адаптивного пространственного кодирования, основанный на ситуативном использовании каждого из рассмотренных методов в зависимости от результатов оценки параметров канала.

Алгоритм интеграции спектральных методов передачи данных в многоканальную технологию MIMO

Для корректного выбора метода пространственного кодирования необходимо учитывать степень временной и частотной коррелированности канала. В этой связи вводятся два параметра – временной коэффициент корреляции K_t и коэффициент частотной корреляции K_f , которые количественно описывают динамику изменения канала во времени и степень его частотной избирательности.

Временной коэффициент K_t характеризует скорость изменения комплексных коэффициентов канала во времени и отражает степень его квазистационарности в пределах двух соседних OFDM-символов. Чем меньше значение K_t , тем быстрее изменяется канал и тем выше влияние доплеровского сдвига. Формула для K_t основана на классической модели Джейкса временной корреляции $J_0(2\pi f_d T)$ и приведена, например, в работах по анализу временной когерентности канала в системах OFDM [11].

Анализ эффективности методов показывает, что критериями их оптимального использования отслеживания взаимного воздействия спектра сигналов при использовании технологии MIMO являются отношение сигнал / шум γ_w , нормированное значение доплеровского сдвига $f_d T$, временной коэффициент K_t :

$$K_t = \frac{1}{N^2} \sum_{l=-N+1}^{N-1} (N - |l|) J_0 \left[2\pi f_d T \left(1 + \frac{G}{N} + \frac{l}{N} \right) \right] \quad (23)$$

и коэффициент частотной корреляции K_f :

$$\begin{aligned} K_f &= \frac{(1 - \lambda)(1 - \lambda^M e^{-j2\pi M/N})}{(1 - \lambda)(1 - \lambda e^{-j2\pi/N})} \times \\ &\times \frac{1}{N^2} \sum_{l=-N+1}^{N-1} (N - |l|) J_0 \left[\frac{2\pi f_d T}{N} \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

где $\lambda = e^{-T/\tau_{\max}}$; G – длительность циклического префикса, выраженная в символьных интервалах

(или относительно длины одного OFDM-символа); N – количество поднесущих OFDM; τ_{\max} – максимальное значение задержки распространения сигнала; $J_0[\cdot]$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Алгоритм метода адаптивного пространственного кодирования показан на рисунке 1.

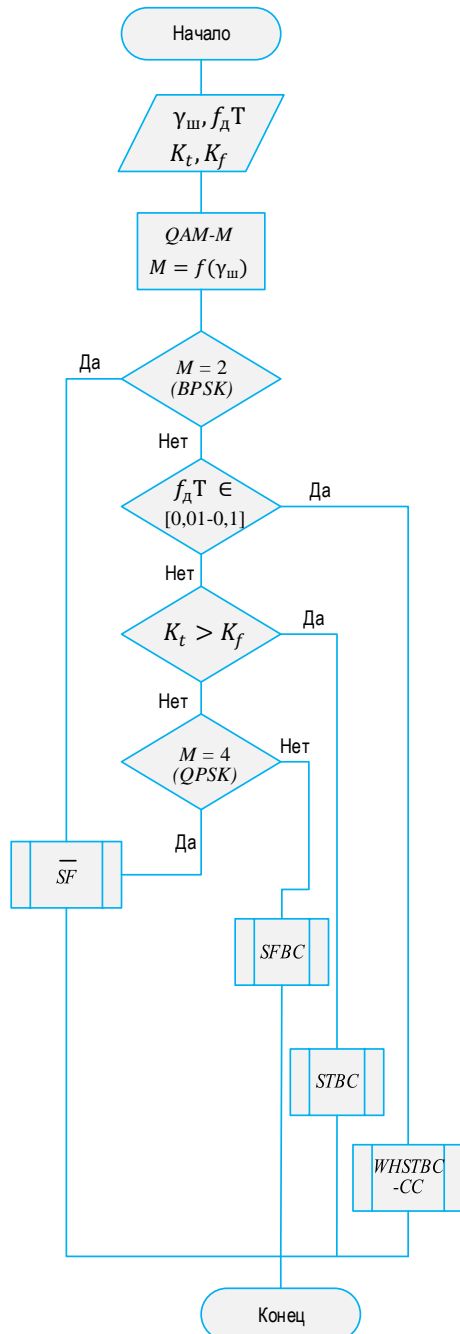


Рис. 1. Алгоритм адаптивного пространственного кодирования для параллельных сигналов при использовании технологии MIMO

Fig. 1. Adaptive Spatial Coding Algorithm for Parallel Signals Using MIMO Technology

Коэффициент частотной корреляции K_f описывает степень взаимной зависимости откликов канала на соседних поднесущих OFDM и определяется

шириной полосы когерентности канала относительно шага поднесущих. Формула для K_f выводится из экспоненциальной модели задержек и классического выражения частотной корреляционной функции $R_f(\Delta f)$, применяемой в анализе частотно-селективных каналов.

Выбор ансамбля сигналов осуществляется в соответствии с методами адаптивной модуляции и помехоустойчивого кодирования, которые реализованы практически во всех современных технологиях сетей мобильной связи и широкополосного доступа. Например, допустимое предельное значение сигнал / шум на входе приемника для QPSK в стандарте IEEE 802.16 спецификаций Wireless MAN-OFDM/OFDM [10] при использовании помехоустойчивого кодирования со скоростями 1/2 и 3/4 составляет 9,4 и 11,2 дБ соответственно.

Схема на рисунке 1 иллюстрирует последовательность операций алгоритма адаптивного пространственного кодирования, однако для корректного понимания требуется более детализированное описание ее функциональных блоков.

Алгоритм начинается с оценки параметров канала на основе пилот-сигналов OFDM. На этом этапе вычисляются:

- отношение сигнал / шум (γ_w);
- нормированное значение доплеровского сдвига ($f_d T$);
- временной коэффициент корреляции (K_t);
- коэффициент частотной корреляции (K_f).

Эти параметры определяют степень нестационарности и частотной избирательности канала. Далее схема реализует ветвление, основанное на сравнении полученных значений с порогами, установленными по результатам моделирования. При $f_d T \leq 0,01 \dots 0,03$ и высокой частотной корреляции ($K_f \rightarrow 1$) выбирается метод STBC, обеспечивающий максимальную помехоустойчивость в квазистационарных каналах. При $f_d T \geq 0,05$ и умеренной частотной избирательности используется метод SFBC, как более устойчивый к нестационарности.

Если канал одновременно характеризуется высокой нестационарностью и выраженной частотной избирательностью, схема переключается на комбинированный метод WHSTBC-CC, использующий преобразование Уолша – Адамара и сопряженное подавление для снижения чувствительности к амплитудно-частотным характеристикам канала. После выбора метода соответствующий кодировщик формирует пары векторов $\mathbf{d}^{(1)}$, $\mathbf{d}^{(2)}$, которые затем проходят процедуры WHT, CC или классического STBC / SFBC. На выходе схемы формируется поток OFDM-символов, оптимизированный под текущие характеристики канала.

Таким образом, схема на рисунке 1 представляет собой адаптивный механизм выбора пространственного кодирования, где каждый блок выполняет строго определенную функцию: измерение параметров канала, принятие решения, выбор кодировщика и формирование передаваемых сигналов. Ключевым этапом работы алгоритма является определение нормализованных значений доплеровского сдвига частот $f_d T$, относящихся к интервалу $[0,01; 0,1]$, характеризующему наиболее типичные беспроводные нестационарные каналы, в которых преобладает частотная избирательность.

Для практической реализации алгоритма адаптивного пространственного кодирования в условиях нестационарных частотно-селективных каналов была разработана экспериментальная система мониторинга параметров радиоканала. Система предназначена для регистрации пространственно-временных характеристик сигнала, оценки нормализованных значений доплеровского сдвига и частотной избирательности, а также контроля амплитудно-частотных и фазовых искажений в реальном времени. Использование такой системы позволяет сопоставлять результаты моделирования с эмпирическими данными и уточнять параметры адаптации кодирования в зависимости от текущего состояния радиосреды.

Решение проблемы

В случае системы 2x2 MIMO приведенное выше уравнение может быть выражено матрицами (11), которые зависят от расстояния между элементами TX и RX [11], где TX – антенны передачи, а RX – антенны приема. На рисунке 2 видно, что источники и приемники сигнала расположены в вершинах трапеции.

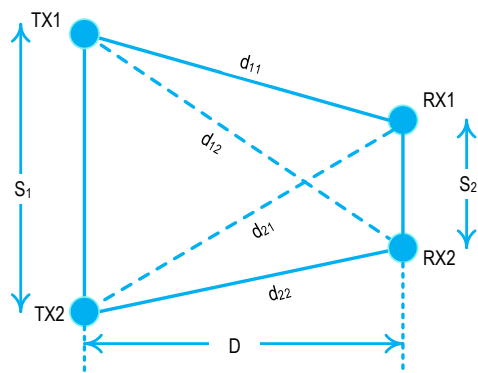


Рис. 2. Сценарий LoS для MIMO 2x2 с параллельными массивами

Fig. 2. Line-of-Sight System for MIMO 2x2 with Parallel Arrays

На основе описанных выше двухканальных передатчиков была построена экспериментальная система мониторинга радиоканала, предназначенная для сбора и анализа параметров среды распространения сигнала в диапазоне 900

МГц и 2,4 ГГц. Архитектура системы включает подвижный измерительный комплекс SDR, антенны передачи и приема, а также модуль программной обработки данных. Система обеспечивает регистрацию амплитудно-частотных характеристик канала и оценку влияния нестационарности, частотной избирательности и доплеровских искажений при различных сценариях движения и пространственного расположения узлов.

Измерения канала 2x2 MIMO-OFDM были выполнены с использованием программно-определяемой радиоплатформы собственной разработки с применением двухканальных приемопередатчиков MIMO Agile AD9361 компании Analog Devices. AD9361 – это широкополосный приемопередатчик с двумя выходами и двумя входами. Аппаратура передает сигналы OFDM канального зондирования с тремя различными разностями поднесущих, как показано в таблице 1, где LSS (*аббр. от англ. Low Spectral Signal*) – сигнал с низкой спектральной плотностью или узкой полосой частот; MSS (*аббр. от англ. Medium Spectral Signal*) – сигнал со средней спектральной плотностью или средней полосой частот; CCC – совмещенная спектральная конфигурация (в одном канале совмещаются разные типы сигналов).

ТАБЛИЦА 1. Параметры пакетов OFDM

TABLE 1. OFDM Package Parameters

Параметры	LSS	MSS	CCC
Частота дискретизации основной полосы частот (МГц)	32,768	32,768	32,768
Ширина полосы измерительного канала (МГц)	8,2	9,0	6,7
Центральная частота (МГц)	920	920	920
Модуляция	QPSK	QPSK	QPSK
Количество OFDM-символов	6003	593	156
Количество занятых поднесущих	52	600	1705
Разнос поднесущих (кГц)	156,25	15	348
Длина БПФ	208	2184	8384
Период OFDM-символа (мкс)	6,4	66,67	299
Защитный интервал (мкс)	1,6	16,67	75

Было использовано специально разработанное программное обеспечение с пользовательским интерфейсом, работающее на операционной системе Windows. Передатчик посылает OFDM-сигналы, которые, в конечном итоге, записываются на прием-

ном устройстве. В результате постобработки авторы получили сложную функцию передачи канала или частотную характеристику технологии параллельного приема сигналов при использовании технологии MIMO. Передаваемые формы OFDM-сигналов (выборки) генерировались в автономном режиме на ПК с помощью MATLAB. Собственная платформа оснащена программируемой вентиляционной матрицей, которая передает сгенерированные в автономном режиме сигналы на цифро-аналоговый преобразователь AD9361.

Разработанная система мониторинга позволила не только осуществлять прием и запись сигнала (Таблица 2), но и контролировать параметры радиосреды в реальном времени. С ее помощью определялись изменения амплитудно-частотных характеристик канала, вызванные движением узлов и внешними электромагнитными помехами, что обеспечило получение репрезентативных данных для последующего анализа эффективности методов пространственно-временного кодирования.

ТАБЛИЦА 2. Параметры измерений

TABLE 2. Measurement Parameters

Параметры	Значения
Система MIMO	2×2
Центральная частота	920 МГц
Длительность пакета	50 мс
Частота дискретизации	32,768 МГц
Мощность передачи	23 дБм
Усиление антенны TX	6 дБи
Усиление антенны RX	2 дБи
Расстояние между антеннами TX	2 м
Расстояние между антеннами RX	1 м
Высота антенны TX, h_{TX}	3,6 м
Высота антенны RX, h_{RX}	1,8 м
Модуляция	QPSK

В процессе проведения измерений использовались антенны передачи (TX) и приема (RX), размещенные с привязкой к координатам, полученным с применением глобальной навигационной спутниковой системы позиционирования (GPS). Средняя длина измерительного маршрута составила 250 м, а скорость движения платформы подвижного измерительного комплекса SDR на базе MIMO Agile AD9361 – около 55 км/ч. В контексте экспериментов MIMO-OFDM измерительный маршрут – это заранее выбранный отрезок пути, по которому перемещается приемная или передающая установка (платформа с антенной и приемным оборудованием), во время которого производится последовательный сбор данных о параметрах радиоканала. Маршрут имеет точку начала и точку конца, часто с

известными GPS-координатами. Экспериментальные условия включали как прямую видимость, так и отсутствие прямой видимости. Длина маршрута (250 м) определяет объем пространственных измерений. Расстояние между передатчиком и приемником варьировалось в пределах от 3 до 250 м. Потенциальные преграды для прямого распространения сигнала, способствующие возникновению многолучевого распространения, включали деревья с плотной кроной, жилую и офисную застройку, дорожную инфраструктуру (знаки, металлические ограждения), а также как движущиеся, так и статичные транспортные средства.

Результаты

Для анализа параметров радиоканала в указанных сценариях применялась передача OFDM-сигналов, характеристики которых приведены в таблице 1. Под пакетами OFDM понимаются предварительно сформированные последовательности OFDM-символов, передаваемые в течение фиксированного интервала времени. Длительность пакета составляла 50 мс. Величина защитного интервала между символами варьировалась в зависимости от конфигурации. Например, в конфигурации сигнала с низкой спектральной плотностью она составляла 1,6 мкс, чего оказалось достаточно для подавления межсимвольной интерференции в условиях ограниченного радиуса действия и умеренного уровня рассеяния.

На этапе натурных испытаний была построена система мониторинга для сбора спектральных характеристик сигнала и регистрации параметров радиоканала в диапазоне 2,4 ГГц. Сигналы анализировались с помощью бюджетного спектроанализатора LCSA (аббр. от англ. Low-Cost Spectrum Analyzer). Программа осуществляла захват радиосигнала, отображение и анализ радиочастотного спектра на частоте 2,4 ГГц в режиме реального времени. Спектр сигнала (рисунок 3) отражает работу передатчика (стандарт IEEE 802.11n), настроенного на 8-й канал с центральной частотой 2,447 ГГц и расположенного на расстоянии 10 м. Вертикальная шкала отражает уровень относительный сигнала, посылаемого радиомодулем.

Полученный в ходе натурных испытаний спектр (см. рисунок 3) представляет собой эмпирическое подтверждение наличия частотной избирательности канала, а также возможных доплеровских искажений, обусловленных перемещением узлов мониторинга или изменением радиосреды. Эти факторы напрямую влияют на эффективность передачи данных в беспроводной системе, особенно при использовании технологии MIMO.

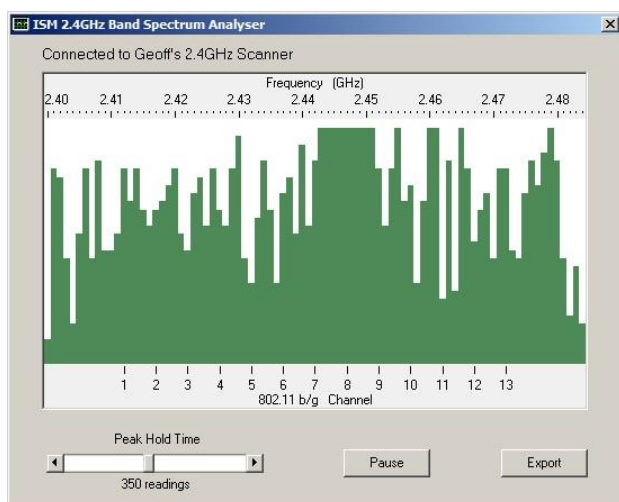


Рис. 3. Спектр сигнала беспроводного маршрутизатора IEEE 802.11n

Fig. 3. Signal Spectrum of the IEEE 802.11n Wireless Router

Алгоритм адаптивного пространственного кодирования, разработанный в рамках данной работы, предназначен для динамической оптимизации структуры передаваемых сигналов в зависимости от текущих параметров канала. Он учитывает нормированное значение доплеровского сдвига $f_d T$, коэффициенты временной K_t и частотной корреляции K_f , а также спектральную конфигурацию сигнала (LSS, MSS, CCC). В контексте системы мониторинга, где количество узлов и модулей может варьироваться, а топология сети изменяется в зависимости от площади объекта, применение такого алгоритма позволяет обеспечить устойчивую и помехозащищенную передачу данных между элементами системы.

На практике это означает, что каждый узел мониторинга, оснащенный радиомодулем, способен адаптировать параметры кодирования в реальном времени, исходя из локальных условий распространения сигнала. Например, при обнаружении высокой частотной избирательности (что видно на спектре сигнала маршрутизатора на рисунке 3), система может переключиться на использование метода SFBC с преобразованием Уолша – Адамара, обеспечивающим равномерное распределение отношения сигнал / шум по поднесущим. В условиях высокой нестационарности, связанной с движением узлов или изменением среды, предпочтение может быть отдано алгоритму сопряженного подавления, устойчивому к доплеровским искажениям.

Таким образом, инфраструктура системы мониторинга, построенная на принципах MIMO и OFDM, не просто передает данные между узлами, но и реализует интеллектуальную адаптацию методов кодирования. Это позволяет не только повысить надежность связи, но и оптимизировать использование аппаратных ресурсов, особенно в условиях

ограниченной вычислительной мощности и энергоемкости.

Применение алгоритма адаптивного пространственного кодирования в такой системе обеспечивает:

- устойчивую передачу данных при изменении условий распространения сигнала;
- снижение вероятности ошибок за счет выбора оптимального метода кодирования;
- возможность масштабирования сети без потери качества связи;
- корректную работу в условиях многолучевого распространения и интерференции.

Следовательно, представленная на рисунке 3 спектральная картина сигнала маршрутизатора IEEE 802.11n не является изолированным экспериментом, а служит иллюстрацией реальных условий, в которых функционирует система мониторинга. Таким образом, разработанный адаптивный алгоритм пространственного кодирования обеспечивает эффективную обработку подобных сигналов, повышая общую устойчивость и производительность беспроводной сети мониторинга.

В процессе эксплуатации система должна быть готова к поддержке значительного количества как узлов, так и модулей на каждом из них. В зависимости от площади объекта мониторинга и сложности сети могут использоваться различные конфигурации инфраструктуры системы пространственно-временного кодирования. Главное здесь – обеспечить гибкость системы, дать возможность легко модифицировать необходимый функционал или быстро подстроить параметры системы под разные условия. Еще одним важным параметром является нагрузка на аппаратные ресурсы. К сожалению, в ходе разработки каждой из версий систем был проведен комплекс тестов с использованием имеющегося аппаратного обеспечения. То есть, при разработке первой и второй версий системы мониторинга у авторов не было возможности использовать микрокомпьютеры Raspberry Pi, тестирование проводилось на компьютерах (рисунок 4).

В целях улучшения дальномерных свойств системы целесообразно зонировать ее для выбора методов пространственно-временного кодирования. Для этого требуется разработка новой, наборной системы отдельных элементов и ее облучение с помощью двух из трех антенн промышленного Asus RT-N16 (2×3:2 MIMO), которые удалены из корпуса и дополнительно разнесены на расстояние до 2а.

Nodes map / anzodev-desktop

source: http://192.168.1.98:36929/

Host	Port	Hardware address	Operating system	Access point	Log files
192.168.1.98	36929	70:85:c2:4f:6d:9c	Linux 4.15.0-42-generic		requests.log, system.log

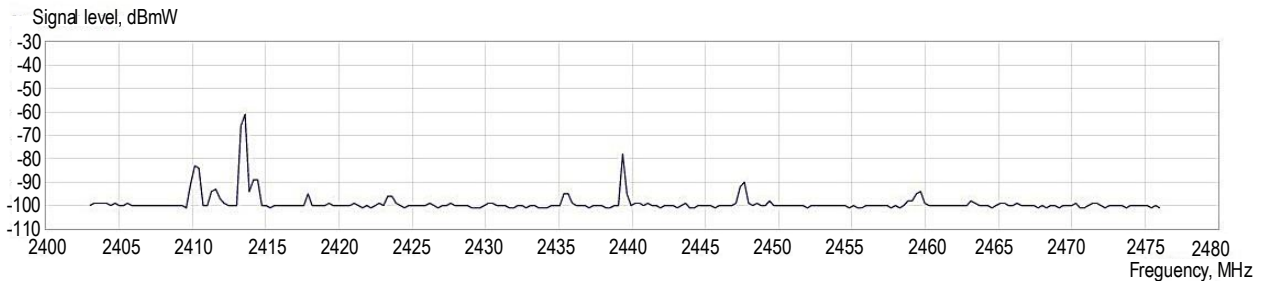


Chart	Port	Address	Accepted	Sent	Worked	Connected
1	/dev/ttyACM0	CA-F3-BC-D8	675	675	6:06	6:06

Рис. 4. Веб-интерфейс системы мониторинга

Fig. 4. Web Interface of the Monitoring System

В качестве приемного оборудования желательно использовать сетевую карту на базе беспроводного контроллера Atheros AR9287 (2×2:2 MIMO), а в качестве полевых датчиков – Rorolu Wixel (на микроконтроллере TI CC2511F32). MDRV собирает данные с датчиков и отображает результат в сводном виде в режиме реального времени. Таким образом, проведенные натурные испытания подтвердили эффективность разработанного алгоритма адаптивного пространственного кодирования для параллельных сигналов в условиях технологии MIMO. В ходе экспериментов была продемонстрирована способность алгоритма к динамической адаптации структуры кодирования в зависимости от текущих параметров канала, включая спектральную конфигурацию сигнала (LSS, MSS, CCC), уровень доплеровского сдвига и степень временной / частотной корреляции. Исследование показало, что алгоритм обеспечивает устойчивую передачу OFDM-сигналов при переменной радиосреде и движении платформы, включая сценарии прямой видимости и ее отсутствия, за счет выбора оптимального метода пространственно-временного кодирования в реальном времени.

Использование SDR-платформы на базе AD9361 и бюджетного спектроанализатора LCSA позволило не только зафиксировать спектральные характеристики канала, но и верифицировать работу алгоритма в условиях многолучевого распространения и интерференции. Реализация алгоритма адаптивного пространственного кодирования в виде автономного программного модуля с параметризуемыми интерфейсами обеспечила его гибкую интеграцию в различные конфигурации MIMO-сетей. Модульная архитектура программного комплекса позволила адаптировать алгоритм под специфические условия распространения сигнала, а также упростила его масштабирование при увеличении

числа узлов и модернизацию при изменении требований к кодированию.

Таким образом, алгоритм адаптивного пространственного кодирования представляет собой ключевой элемент интеллектуальной обработки сигналов в MIMO-системах, обеспечивая высокую надежность связи, устойчивость к помехам и возможность функционирования в сложных радиотехнических условиях.

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало, что методы STBC и SFBC обладают высокой эффективностью при передаче данных в нестационарных частотно-селективных каналах, однако каждый из них имеет ограничения, связанные с характером и степенью проявления доплеровских искажений и частотной избирательности. Метод STBC показывает наилучшие результаты при низких значениях нормированного доплеровского сдвига, обеспечивая устойчивость к межсимвольным помехам, но теряет эффективность при возрастании нестационарности канала. Метод SFBC, напротив, лучше работает в условиях высокой нестационарности, но чувствителен к амплитудно-частотным искажениям. Разработанная в работе модификация пространственного кодирования с использованием преобразования Уолша – Адамара и алгоритма сопряженного подавления позволяет частично компенсировать указанные недостатки, повышая устойчивость системы и обеспечивая выигрыш по энергии до 12 дБ по сравнению с классическим STBC. Экспериментальные измерения на подвижной SDR-платформе подтвердили работоспособность предложенного подхода в условиях реальной радиосреды, включая сценарии с прямой видимостью и без нее. Система успешно передавала и принимала OFDM-сигналы с различными

спектральными конфигурациями. Полученные результаты указывают на целесообразность применения адаптивного пространственного кодирования, при котором выбор метода осуществляется в зависимости от текущих параметров канала, что

открывает возможности для повышения помехоустойчивости и спектральной эффективности перспективных беспроводных систем связи в сложных эксплуатационных условиях.

Список источников

1. Nizamaldeen S.A., Al-Qaradaghi T.M. A comparison between STBC-OFDM and SFBC-OFDM // *International Journal of Arts and Sciences*. 2014. Vol. 6. Iss. 5. PP. 157–166.
2. Hanzo L., Akhtman J., Wang L. MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo Transceivers. IEEE, 2011.
3. Yeh H.G. Architectures for MIMO-OFDM System in Frequency Selective Mobile Fading Channels // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2015. Vol. 62. Iss. 12. PP. 1189–1193. DOI:10.1109/TCSII.2015.2498300
4. Al-Dweik A., Kalbat F., Muhaidat S. Filio O., Ali S.M. Robust MIMO-OFDM System for Frequency Selective Mobile Wireless Channels // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014. Vol. 64. Iss. 5. PP. 1739–1749. DOI:10.1109/TVT.2014.2340736
5. Medina C.A., Sampaio-Neto R. Frequency domain equalization space-time block-coded CDMA transmission system // *Journal on Wireless Communications and Networking*. 2011. Vol. 2011. P. 80. DOI:10.1186/1687-1499-2011-80
6. Солодовник В.И., Науменко Н.И. Пространственно-частотное блочное кодирование с двухрежимной индексной модуляцией OFDM и повышенной устойчивостью к частотной селективности канала // *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2020. Т. 63. № 4. С. 217–234. DOI:10.20535/s0021347020040020. EDN:SWLRPQ
7. Youssefi M., Bounouader N., Guennoun Z., El Abbadi J. Adaptive Switching between Space-Time and Space-Frequency Block Coded OFDM Systems in Rayleigh Fading Channel // *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. 2013. Vol. 6. Iss. 6. PP. 318–320. DOI:10.4236/ijcns.2013.66034
8. Kumar R.R., Indumathi P., Pandian R., Jacob T.P., Pravin A., Prasad K.M. Adaptive modulation and coding in a changing wireless environment // *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 2850. Iss. 1. P. 030011. DOI:10.1063/5.0208281
9. Lee N., Kang J. Lee N., Kang J. Adaptive switching between space-time and space-frequency block coded OFDM Systems // *Proceedings of the Military Communications Conference (San Diego, USA, 16–19 November 2008)*. IEEE, 2008. DOI:10.1109/MILCOM.2008.4753221
10. Azza M.A., El Yahyaoui M., El Moussati A. Adaptive Modulation and Coding for the IEEE 802.15.3c High Speed Interface Physical Layer Mode // *Proceedings of the Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies (MedCT 2015, Saïdia, Morocco, 7–9 May 2015)*. Lecture Notes in Electrical Engineering. Cham: Springer, 2016. Vol. 380. PP. 365–371. DOI:10.1007/978-3-319-30301-7_38
11. Kyritsi P., Chizhik D. Capacity of multiple antenna systems in free space and above perfect ground // *IEEE Communications Letters*. 2002. Vol. 6. Iss. 8. PP. 325–327. DOI:10.1109/LCOMM.2002.802049
12. Тихвинский В.О., Володина Е.Е. Подвижная связь третьего поколения. Экономика и качество услуг. М.: Радио и связь, 2005. 240 с.
13. Балабанов И.В., Сидорин В.В. Обеспечение доступности услуг в сетях подвижной связи // *Интернет-журнал науковедение*. 2014. № 2(21). С. 95. EDN:SJFMHD

References

1. Nizamaldeen S.A., Al-Qaradaghi T.M. A comparison between STBC-OFDM and SFBC-OFDM. *International Journal of Arts and Sciences*. 2014;6(5):157–166.
2. Hanzo L., Akhtman J., Wang L. *MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo Transceivers*. IEEE; 2011.
3. Yeh H.G. Architectures for MIMO-OFDM System in Frequency Selective Mobile Fading Channels. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2015;62(12):1189–1193. DOI:10.1109/TCSII.2015.2498300
4. Al-Dweik A., Kalbat F., Muhaidat S. Filio O., Ali S.M. Robust MIMO-OFDM System for Frequency Selective Mobile Wireless Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014;64(5):1739–1749. DOI:10.1109/TVT.2014.2340736
5. Medina C.A., Sampaio-Neto R. Frequency domain equalization space-time block-coded CDMA transmission system. *Journal on Wireless Communications and Networking*. 2011;2011:80. DOI:10.1186/1687-1499-2011-80
6. Solodovnyk V.I., Naumenko N.I. Space-Frequency Block Coding with Two-Mode Index Modulation OFDM and Increased Stability to Channel Frequency Selectivity. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2020;63(4):186–200. DOI:10.20535/s0021347020040020. EDN:SWLRPQ
7. Youssefi M., Bounouader N., Guennoun Z., El Abbadi J. Adaptive Switching between Space-Time and Space-Frequency Block Coded OFDM Systems in Rayleigh Fading Channel. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. 2013;6(6):318–320. DOI:10.4236/ijcns.2013.66034
8. Kumar R.R., Indumathi P., Pandian R., Jacob T.P., Pravin A., Prasad K.M. Adaptive modulation and coding in a changing wireless environment. *AIP Conference Proceedings*. 2024;2850(1):030011. DOI:10.1063/5.0208281


9. Lee N., Kang J. Adaptive switching between space-time and space-frequency block coded OFDM Systems. *Proceedings of the Military Communications Conference, 16–19 November 2008, San Diego, USA*. IEEE; 2008. DOI:10.1109/MILCOM.2008.4753221
10. Azza M.A., El Yahyaoui M., El Moussati A. Adaptive Modulation and Coding for the IEEE 802.15.3c High Speed Interface Physical Layer Mode. *Proceedings of the Mediterranean Conference on Information & Communication Technologies, MedCT 2015, 7–9 May 2015, Saïdia, Morocco. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol.380*. Cham: Springer; 2016. p.365–371. DOI:10.1007/978-3-319-30301-7_38
11. Kyritsi P., Chizhik D. Capacity of multiple antenna systems in free space and above perfect ground. *IEEE Communications Letters*. 2002;6(8):325–327. DOI:10.1109/LCOMM.2002.802049
12. Tikhvinsky V.O., Volodina E.E. *Mobile communications of the third generation. Economics and quality of services*. Moscow: Radio and Communications Publ., 2005. p.240. (in Russ.)
13. Balabanov I.V., Sidorin V.V. Ensuring the availability of services in mobile communication networks. *Internet-zhurnal naukovedenie*. 2014; 2(21):95. EDN:SJFMHD

Статья поступила в редакцию 08.11.2025; одобрена после рецензирования 20.12.2025; принята к публикации 12.01.2026

The article was submitted 08.11.2025; approved after reviewing 20.12.2025; accepted for publication 12.01.2026

Информация об авторе:

НГИЕМ
Ван Донг

аспирант кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)
 <https://orcid.org/0009-0006-6318-294X>

Автор сообщает об отсутствии конфликтов интересов.

The author declares no conflicts of interests.