

11. Bain A.M. Sposob kodirovaniya v sistemakh upravleniya energoobespecheniem [Encoding method in energy management systems], *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences], 2012, No. 3, pp. 238-239.
12. Samoylov A.G., Sidorenko A.A. Primenenie kodov RS v kaskade s dvoichnymi kodami s tsel'yu povysheniya effektivnosti bor'by s nezavisimymi oshibkami [Application of RS codes in cascade with binary codes to increase efficiency in combating independent errors], *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and Technology of Electronic Devices], 2014, No. 3, pp. 2-7.
13. Sidorenko A.A. Adaptivnoe pomekhoustoychivoe kodirovanie [Adaptive noise-immune coding], *Mater. X mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii»* [Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference "Promising Technologies in Information Transmission Means"]. Vladimir-Suzdal', 2013, Vol. 1, pp. 152-154.
14. Feer K. Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i rasshireniya spektra [Wireless digital communication. modulation and spread spectrum techniques]. Moscow: Radio i svyaz', 2001.
15. Chernyy F.B. Rasprostraneniye radiovoln: monografiya [Propagation of radio waves: monograph]. Moscow: Sov. radio, 1972, 464 p.
16. Akhmetyanov K.K., Glushkov V.A., Dormidontov A.V., Nesterenko A.G. Teoriya elektricheskoy svyazi [Theory of electric communication], ed. by Vasil'eva K.K. Ul'yanovsk: UIGTU, 2008, 382 p.
17. Hunt B.T., Haab D.B., Sego T.C., Holschuh T.V., Moradi Hunt H. Examining the Performance of MIL-STD-188-110D Waveform 0 Against FBMC-SS Over Skywave HF Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, Vol. 71, No. 11.
18. Zhang Z., Jin Z., Li Y., Song G., Wang Y. Multi-Stage Receiver of MIL-STD-188-110D Waveform 0 for High-Frequency Communication, *IEEE Communications Letters*, 2024, Vol. 28, No. 5.
19. MIL-STD-188-110D – Interoperability and Performance Standards for Data Modems. 27 APRIL 2000.
20. Martyshevskaya D.A., Polushin P.A. Modelirovanie svertochnogo metoda obrabotki signalov pri mezhsimvol'noy interferentsii [Modeling of convolutional signal processing methods under inter-symbol interference], *XXI MNK studentov i molodykh uchenykh «Sovremennye tekhnika i tekhnologii»: Sb. dokladov* [XXI Conference of Students and Young Scientists "Modern Techniques and Technologies": Collection of Reports]. Tomsk: TPU, 2015, pp. 437.
21. Naryshkin E.M., Serkov V.P. Volnovaya sluzhba i antennoye ustroystvo. Ch. 1. Teoriya elektromagnitnogo polya i rasprostraneniye radiovoln: monografiya [Wave service and antenna devices. Part 1. Theory of electromagnetic field and radio wave propagation: monograph]. Moscow: Voenizdat, 1982, 288 p.
22. Sklyar B. Tsifrovaya svyaz' [Digital communication]. Moscow: Izdatel'skiy dom Vil'yams, 2003, 1104 p.
23. Shennon K. Matematicheskaya teoriya svyazi. Raboty po teorii informatsii i kibernetiki [Mathematical Theory of Communication. Works on Information Theory and Cybernetics]. Moscow: Nauka, 1963.

Рыбаков Алексей Игоревич – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: lexus.r1@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; старший преподаватель кафедры беспроводных технологий и систем.

Rybakov Alexey Igorevich – St. Petersburg State University of Telecommunications named after prof. M.A. Bonch-Bruevich; e-mail: lexus.r1@gmail.com; St. Petersburg, Russia; senior lecturer at the Department of Wireless Technologies and Systems.

УДК 681.1

DOI 10.18522/2311-3103-2025-4-227-236

В.П. Федосов, А.В. Циркуленко

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ММО-OFDM К АКТИВНЫМ ПОМЕХАМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ

Современные системы связи часто работают в условиях сложной помехово-сигнальной обстановки, при этом существуют разные способы уменьшения ошибки восстановленного сигнала. Часть способов касается непосредственно математических алгоритмов обработки в приемнике, таких, однако есть и другие подходы, основанные на пространственной фильтрации сигналов. В частности, в последние годы активно получил развитие подход, основанный на весовой обработке сигналов, полученных с разных антенн, с использованием корреляционной матрицы входного сигнала, что позволяет более эффективно использовать информацию с антенн за счет выбора

антенны с максимальным уровнем полезного сигнала и более низкими уровнями шумов и помех, что представляет собой физическое формирование эквивалентной диаграммы направленности приемной антенной решетки с максимумом на путь с максимальным уровнем полезного сигнала и минимумами на другие. Применение этого подхода представляет практический интерес, особенно в системах с наличием активных помех, например, от станций радиоэлектронной борьбы, так как способно повысить качество восстановления сигнала. Отдельно следует отметить, что в случае наличия активных помех для выбора собственного вектора для весовой обработки следует использовать метод, основанный на минимуме среднеквадратической ошибке восстановления пилот-тонов (что возможно в OFDM), так как в случае выбора максимального собственного числа неизвестно – оно будет являться сигнальным или помеховым в случае ее большого уровня. В настоящей работе приводится экспериментальное исследование адаптивного алгоритма обработки пространственно-временных сигналов для системы связи MIMO-OFDM с различными уровнями активной помехи от станции радиоэлектронной борьбы (РЭБ). При этом эксперименты проводятся как в нисходящем (Downlink, от базовой станции к мобильной), так и восходящем (Uplink, от мобильной станции к базовой станции) канале с применением адаптации как на стороне БС, так и на стороне МС, и обоих. Показано, что применение алгоритма способно улучшить качество обработки сигнала и снизить уровень вероятности ошибки битов (BER – bit error rate) для широкого диапазона отношений сигнал-шум (SNR – signal-to-noise ratio) даже при неидеальной оценке канала (по пилот-поднесущим).

MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); активная помеха, алгоритм адаптации; станция РЭБ, восходящий канал; нисходящий канал; пространственно-временная обработка.

V.P. Fedosov, A.V. Tsirkulenko

STUDY OF THE STABILITY OF THE MIMO-OFDM SYSTEM TO ACTIVE INTERFERENCE USING AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIAL-TEMPORAL SIGNALS

Modern communication systems often operate in a complex interference and signaling environment, while there are various ways to reduce the error of the restored signal. Some of the methods relate directly to mathematical processing algorithms in the receiver, however, there are other approaches based on spatial filtering of signals. In particular, in recent years, an approach based on the weighted processing of signals received from different antennas has been actively developed using the correlation matrix of the input signal, which makes it possible to use information from the antennas more efficiently by choosing an antenna with the maximum level of useful signal and lower levels of noise and interference, which is physically the formation of an equivalent radiation patterns of the receiving antenna array with a maximum on the path with the maximum level of the useful signal and minima on others. The application of this approach is of practical interest, especially in systems with active interference, for example, from electronic warfare stations, as it can improve the quality of signal recovery. Separately, it should be noted that in the case of active interference, a method based on the minimum RMS error of restoring the pilot tones should be used to select the eigenvector for weight processing (which is possible in OFDM), since if the maximum eigenvalue is selected, it is unknown whether it will be signaling or interfering if it is high. This paper presents an experimental study of an adaptive algorithm for processing spatiotemporal signals for a MIMO-OFDM communication system with different levels of active interference from an electronic warfare (EW) station. In this case, experiments are carried out both in the descending (Downlink, from the base station to the mobile) and ascending (Uplink, from the mobile station to the base station) channel using adaptation on both the BS and MS sides, and both. It is shown that the application of the algorithm can improve the quality of signal processing and reduce the bit error rate for a wide range of signal-to-noise ratios (SNR – signal-to-noise ratio), even with imperfect channel estimation (by pilot tones).

MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); active interference, adaptation algorithm, electronic warfare station, uplink; downlink; space-time processing.

Введение. В современном мире активно происходит развитие сетей связи нового поколения (5G и 6G), при этом возрастают и потребности в скорости и объеме передаваемой информации. При этом из-за ограниченности текущего радиочастотного спектра старые подходы, основанные на увеличении скорости за счет увеличения полезной составляющей спектра, уже не могут быть применимы. Другая проблема применения со-

временных систем связи – сложная помехово-сигнальная обстановка и условия распространения сигнала (например, плотная городская застройка с множеством высотных зданий). Это приводит к тому, что при передаче сигнала возникают такие явления, как:

Замирания, которые вызваны интерференцией из-за многопутного (multipath) распространения сигнала [1–11], при этом они могут быть медленными (из-за затухания сигнала на больших расстояниях) или быстрыми (из-за движения приемника или отражающих объектов вокруг).

Межсимвольная интерференция (ISI, Inter-Symbol Interference), которая возникает из-за многопутного распространения сигнала, когда отраженные копии сигнала приходят с задержкой и накладываются друг на друга, ухудшая качество приема.

Доплеровский сдвиг, который вызван движением передатчика или приемника, приводит к изменению частоты сигнала и искажениям, особенно в мобильных системах связи.

Поглощение и рассеяние, которые возникают, когда сигнал ослабляется при прохождении через различные среды (дождь, туман, здания, деревья и т.д.), что уменьшает его мощность на приемной стороне.

Шумы и помехи, которые могут быть вызваны как естественными источниками (атмосферные и космические шумы), так и техногенными (работа других электронных устройств, перекрестные помехи, интермодуляционные искажения).

Все эти явления ведут к тому, что происходит значительное ухудшение качества связи. Современный способ бороться с этими явлениями – применение систем связи с OFDM, который за счет ортогональности поднесущих, их высокой плотности и циклических префиксов позволяет частично компенсировать их [12]. Также применение OFDM дает возможность к более точной оценке канала за счет применения пилот-поднесущих.

Описание работы системы. Радиосигнал распространяется в воздушной среде в условиях плотной городской застройки [13, 14]. В силу этого канал обладает высокой частотной селективностью из-за многочисленных переотражений. Помеха представляет собой комплексный гауссовский шум с заданным INR. Система связи OFDM моделируется согласно рис. 1.

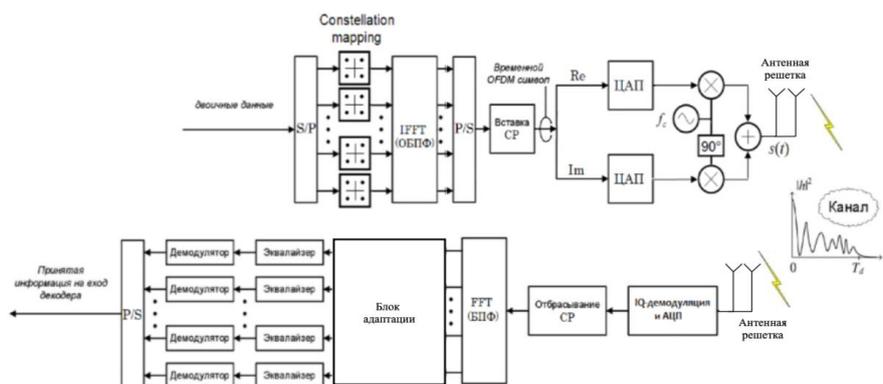


Рис. 1. Система связи с OFDM

Рассмотрим работу этой системы связи [15]. Исходные двоичные данные преобразуются из последовательного кода в параллельный (число параллельных потоков равно общему числу поднесущих). Затем, используя сигнальное созвездие соответствующего вида модуляции (код Грея), битовый поток превращается в поток комплексных чисел. При этом часть поднесущих заполняется так называемыми пилот-тонами. Пилот-тоны – это такие части сигнала, значения которых известны заранее, и которые используются потом для оценки канала. Пример возможного расположения пилот-поднесущих на частотно-временной OFDM-матрице сигнала представлен на рис. 2.

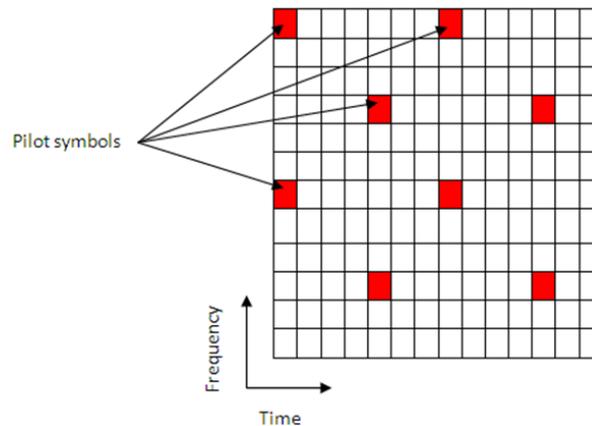


Рис. 2. Вариант расположения пилот-поднесущих в частотно-временной матрице сигнала

К полученному комплексному сигналу применяется обратное преобразование Фурье, таким образом, получается сигнал во временной области. Затем к этому сигналу добавляются так называемые циклические префиксы – копии последних элементов блока, которая вставляется в начало передаваемого сигнала OFDM, за счет их вставки отраженные и задержанные копии сигнала попадают в область префикса и не влияют на полезную часть данных. После этого готов цифровой сигнал для последующего цифро-аналогового преобразования и переноса на высокую частоту для излучения антенной решеткой передатчика базовой станции по нисходящему каналу.

Сам сигнал проходит через канал связи, который обладает частотной и временной селективностью [16]. В рамках исследования принимается допущение, что канал связи достаточно стационарен, и за время прохождения сигнала от базовой станции к мобильной и обратно меняется незначительно.

В случае частотной и временной селективности коэффициенты канальной матрицы начинают зависеть от времени и частоты поднесущей, тогда в общем виде можно записать:

$$\mathbf{H}(t, f) = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{H}(t) e^{-2j\pi f \tau_l}, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}(t)$ – комплексная огибающая запаздывающего сигнала для l -го пути; τ_l – задержка сигнала l -го пути; f – частота; L – количество путей сигналов в канале.

Тогда сигнал, принятый на входе приемника, можно описать как:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}(t, f) \cdot \mathbf{X} + \mathbf{N}, \quad (2)$$

где \mathbf{X} – матрица сигнала с передатчика системы связи, где одна из компонент является шумовым сигналом станции РЭБ; $\mathbf{H}(t, f)$ – канальная матрица среды распространения, зависящая от времени и частоты; \mathbf{N} – матрица аддитивного квази-белого гауссовского шума; \mathbf{Y} – матрица принятого сигнала на входе приемника.

После прохождения канала происходит извлечение синфазной и квадратурной составляющей радиосигнала (путем умножения входного радиосигнала на сигнал от гетеродина и последующей фильтрацией, и выделением информационного OFDM-сигнала)

Так как места вставки циклических префиксов известны, то происходит их отбрасывание для устранения избыточности из сигнала. Затем для каждой поднесущей производится оценка матрицы канала и последующая сплайн-интерполяция с помощью пилот-тонов [17]:

$$\mathbf{H}' = \frac{\mathbf{Y}}{\mathbf{P}}, \quad (3)$$

где \mathbf{H}' – оценка канальной матрицы; \mathbf{P} – матрица значений пилот-поднесущих.

Теперь можно приступить к весовой обработке принятого сигнала с помощью адаптивного алгоритма [18, 19]. Для этого необходимо получить оценку корреляционной матрицы принятого сигнала на выходах антенной решетки (АР):

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^T}{N_{used}}, \quad (4)$$

где N_{used} – число поднесущих исходного сигнала OFDM.

А затем вычислить матрицу собственных значений и собственных векторов через Эйлерово разложение матрицы:

$$\mathbf{R} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{V}^H, \quad (5)$$

где \mathbf{V} – матрица собственных векторов пространственной корреляционной матрицы; $\mathbf{\Lambda}$ – матрица её собственных чисел.

Именно здесь и возникает проблема, связанная с оценкой необходимого собственного числа. Если уровень шума (INR) будет достаточно большим, то в случае выбора максимального собственного числа по амплитуде оно может быть обусловлено помеховым процессом, а не сигналом, и тогда будет выбран неверный собственный вектор, и весовая обработка будет осуществлена некорректно [20, 21].

По этой причине следует применять критерий минимальной среднеквадратической ошибки (СКО или MSE – mean squared error) воспроизведения пилот-поднесущих, тогда будет очевидно, что нужно выбирать то собственное число, для которого эта ошибка будет минимальна, что будет соответствовать лучшему выбору пути передачи сигнала [22]. Тогда можно сформировать сигнал после весовой обработки соответствующим собственным вектором:

$$\mathbf{Y}' = \mathbf{V}[id_{min}]^T \cdot \mathbf{Y}, \quad (6)$$

Далее выполняется формирование MMSE-оценки (minimum mean squared error) [23–25] переданного сигнала из принятого по формулам:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{W}_{MMSE}, \quad (7)$$

$$\mathbf{W}_{MMSE} = (\sigma_n^2 \cdot \mathbf{I}_{N_{tx}} + \mathbf{H}^H \cdot \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H, \quad (8)$$

где σ_n^2 – дисперсия шума; $\mathbf{I}_{N_{tx}}$ – единичная матрица размера $N_{tx} \times N_{tx}$; \mathbf{H}^H – сопряженно-транспонированная (эрмитова) матрица \mathbf{H} .

Затем из полученной оценки необходимо получить поток битов путем демодуляции по соответствующему сигнальному созвездию (в данном исследовании рассматривается так называемое «жесткое» решение – когда принятые символы модуляции округляются до ближайших символов созвездия), и восстановить последовательный поток из параллельного.

В конце происходит подсчет частоты ошибки битов.

Моделирование. Итоговая оценка частоты ошибки битов производилась путем усреднения по M реализациям для снижения дисперсии ошибки. В моделировании исследовалась система связи со следующими параметрами:

$N_{tx} = 4$ – число передающих антенн; $N_{rx} = 4$ – число приемных антенн; $N_{sym} = 6$ – число символов во временной области; $N_{used} = 192$ – число поднесущих; $N_p = 48$ – число пилот-поднесущих; $N_{FFT} = 1024$ – число точек FFT; $SNR = 0 \dots 20$ дБ – исследуемые отношения сигнал-шум; $INR = -25 \dots 10,5$ дБ – исследуемые отношения помеха-шум; $BPSK$ – вид модуляции; $M = 1000$ – число усреднений; $N_{path} = N_{rx}$ – число путей в канале;

В качестве антенны использовалась антенная решетка с расстоянием между элементами $\frac{\lambda}{2}$, и $\lambda = 0,03$ м.

Канал – время- и частотно-селективный многопутный с многочисленными переотражениями, плотная городская застройка, воздушная среда, есть компонента прямой видимости.

Моделирование было проведено на языке Matlab [17].

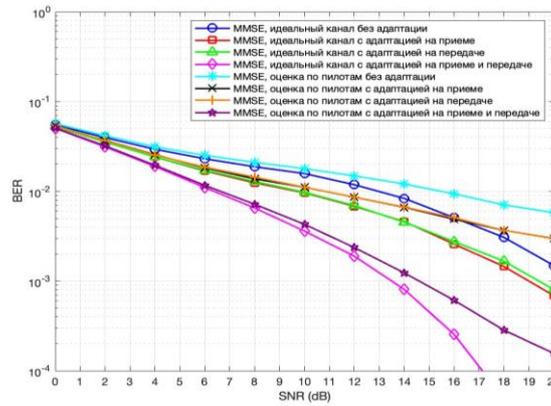


Рис. 3. Усредненные вероятности ошибок битов различных комбинаций алгоритма и оценки канала при $INR = -25$ дБ

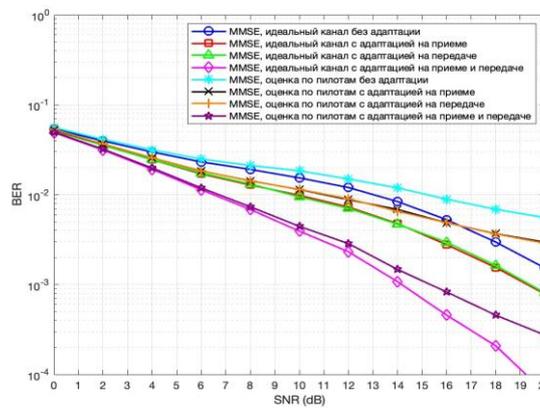


Рис. 4. Усредненные вероятности ошибок битов различных комбинаций алгоритма и оценки канала при $INR = -10$ дБ

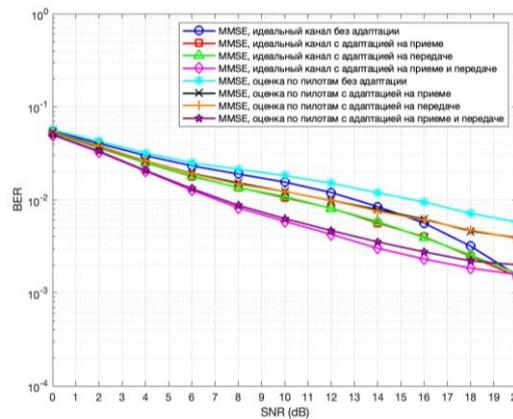


Рис. 5. Усредненные вероятности ошибок битов различных комбинаций алгоритма и оценки канала при $INR = 5$ дБ

Рассмотрим численно, какой выигрыш можно получить от применения адаптивного алгоритма. Это показано в табл. 1. В таблице показан выигрыш (путем деления ошибки без адаптации на ошибку с адаптацией – то есть во сколько раз снижается ошибка) от

применения алгоритма адаптации на приеме, передаче и при двойной адаптации на приеме и передаче по сравнению с случаем без адаптации. Для исследования возьмем фиксированное отношение сигнал-шум $SNR = 12$ дБ.

Таблица 1

Выигрыш от применения адаптивного алгоритма в разных сценариях

	Идеальный канал (прием)	Оценка по пилотам (прием)	Идеальный канал (передача)	Оценка по пилотам (передача)	Идеальный канал (двойная)	Оценка по пилотам (двойная)
-25 дБ	1,73	1,73	1,72	1,76	6,31	6,74
-10 дБ	1,71	1,66	1,65	1,70	5,18	5,24
5 дБ	1,47	1,54	1,47	1,51	2,75	3,18

Анализ полученных графиков и таблицы позволяет сделать вывод о том, что применение адаптивного алгоритма обработки позволяет уменьшить частоту ошибок битов даже в условиях сложного время- и частотно-селективного канала связи с многопутным распространением и наличием активных помех. При этом выигрыш от применения этого алгоритма сохраняется даже в случае положительных отношений помеха-шум, т.е., когда уровень помехи превышает уровень шума, и составляет в этом случае примерно до 2,75 раз при $SNR = 12$ дБ и до 6,74 раз с меньшим уровнем помехи.

Отдельно следует отметить, что применение двойной адаптации на приеме и передаче уменьшает частоту ошибки битов сильнее всего по сравнению со сценариями, когда адаптация происходит только на приеме или на передаче.

Таким образом, в реальных сценариях можно применять двойную адаптацию от БС к МС и обратно, чтобы улучшить качество восстановления сигнала с наибольшим выигрышем по сравнению с обычным детектором и случаями однократных адаптаций, что свидетельствует о постоянной динамической подстройке системы к изменяющимся условиям среды распространения и помехово-сигнальной обстановке.

Выводы. В ходе экспериментального исследования была проанализирована работа системы MIMO-OFDM и ее устойчивость к активным помехам. Полученные данные свидетельствуют о практической значимости полученных результатов, что позволяет использовать разработку в реальных приложениях, например, в военных системах, системах спутниковой и космической связи, гражданских БПЛА и сетях связи новых поколений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mao Hongliang & Feng Wei & Pei Yukui & Ge Ning.* SIC based soft QRD detection for coded single carrier block transmission with unique word // GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference. – 2013. – P. 4348-4352. – 10.1109/GLOCOM.2013.6831757.
2. *Gan Ying & Ling Cong & Mow Wai Ho.* Complex Lattice Reduction Algorithm for Low-Complexity MIMO Detection // Signal Processing, IEEE Transactions on. – 2009. – 57. – P. 2701-2710. – 10.1109/TSP.2009.2016267.
3. *Guo Zhan & Nilsson Peter.* Algorithm and implementation of the K-best Sphere decoding for MIMO detection // Selected Areas in Communications, IEEE Journal on. – 2006. – 24. – P. 491-503. – 10.1109/JSAC.2005.862402.
4. *Федосов В.П., Емельяненко А.В., Гладушенко С.Г., Поморцев П.М.* Методы и алгоритмы многоканальной пространственной обработки широкополосных сигналов // Нелинейный мир. – 2012. – Т. 10, № 11. – С. 731-737.
5. *Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С.* Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Антенны. – 2008. – № 11. – С. 98-104.
6. *Муравицкий Н.С., Федосов В.П.* Метод улучшения приёма в системе беспроводной передачи данных на основе антенных решеток при наличии активных помех // Тр. международной научной конференции «Излучение и рассеяние ЭВМ - ИРЭМВ». – Таганрог: ТТИ ЮФУ. 2009. – С. 412-515.
7. *Федосов В.П., Емельяненко А.В.* Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решётки при использовании MIMO-OFDM в релейском канале связи // Антенны. – 2013. – № 10 (197). – С. 45-49.

8. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в МИМО-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8. – С. 35-43.
9. Xirouchakis I.A. Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations A Ray Tracing Simulator Based on 3GPP TR 25.996 v. 6.1. 0 // Physics Department, University of Athens. – 2008.
10. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm based on antenna arrays for radio communication systems // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 14, No. 3. – P. 301-312.
11. Федосов В.П. Алгоритмы совместной адаптации на приём и передачу в системе связи на основе антенных решёток при наличии активных помех // Известия ЮФУ. Технические науки.
12. Федосов В.П., Терновой Д.О. Алгоритм совместной адаптации на прием и передачу в системе связи на основе антенных решеток // Радиотехника. – 2011. – №. 9. – С. 52-55.
13. Федосов В.П., Романов В.А. Статистическая радиотехника: электронное учебное пособие. – Ростов-на-Дону, 2008.
14. Fedosov V., Jameel J., and Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 012131.
15. Fedosov V.P., Jameel J.S., and Kucheryavenko S.V. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2021. – P. 443-446.
16. Fedosov V., Legin A., and Lomakina A. Algorithms based on MIMO-OFDM technology for realization of digital hydroacoustic communication channel // Izvestiya SfedU, Engineering Sciences. – 2015. – Vol. 168. – P. 148-158.
17. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. – John Wiley & Sons, 2010.
18. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9. Ocean Sensing and Monitoring IX. – 2017. – P. 101860W.
19. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Data transmission in 3D WiMAX channel based on SISO-OFDM and MIMO-OFDM // Izvestiya SFedU. Technical science. Taganrog. – 2020. – No. 6 (216). – P. 6-18. (In Russian).
20. Федосов В.П., Аль-Мусафи Висам Мохаммедтаки М. Джавад, Кучерявенко С.В. Пространственно-временной адаптивный алгоритм с использованием кода Хэмминга на основе модели беспроводного канала 3D-МИМО // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 2. – С. 113-123.
21. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Medical Image Transmission in 3D WiMAX Channel Using Adaptive Algorithm Based on MIMO-OFDM Principles // Conference Proceedings - 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023. – 2023. – P. 236-239.
22. Fedosov V., Lomakina A., Legin A., Voronin V. Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels // Book Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels. International Society for Optics and Photonics. – 2016. – P. 98720G.
23. Kucheryavenko A., Fedosov V. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB // MATEC Web of Conferences. – 2017. – P. 05008.
24. Fedosov V., Legin A. Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side // Serbian journal of electrical engineering. – February 2019. – Vol. 16, No. 1. – P. 71-83.
25. Федосов В.П., Джамил Д.С., Кучерявенко С.В. Сравнение производительностей адаптивного алгоритма и метода минимума среднеквадратического отклонения для передачи изображений на основе систем связи с использованием антенных решеток // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 2. – С. 69-78.

REFERENCE

1. Mao Hongliang & Feng Wei & Pei Yukui & Ge Ning. SIC based soft QRD detection for coded single carrier block transmission with unique word, *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, 2013, pp. 4348-4352. 10.1109/GLOCOM.2013.6831757.
2. Gan Ying & Ling Cong & Mow Wai Ho. Complex Lattice Reduction Algorithm for Low-Complexity MIMO Detection, *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 2009, 57, pp. 2701-2710. 10.1109/TSP.2009.2016267.
3. Guo Zhan & Nilsson Peter. Algorithm and implementation of the K-best Sphere decoding for MIMO detection, *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2006, 24, pp. 491-503. 10.1109/JSAC.2005.862402.

4. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V., Gladushenko S.G., Pomortsev P.M. Metody i algoritmy mnogokanal'noy prostranstvennoy obrabotki shirokopolosnykh signalov [Methods and algorithms of multichannel spatial processing of broadband signals], *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2012, Vol. 10, No. 11, pp. 731-737.
5. Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V., Muravitskiy N.S. Povyshenie effektivnosti radiosvyazi v releevskom kanale na osnove antennoykh reshetok [Improving the efficiency of radio communication in the relay channel based on antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11, pp. 98-104.
6. Muravitskiy N.S., Fedosov V.P. Metod uluchsheniya priema v sisteme besprovodnoy peredachi dannykh na osnove antennoykh reshetok pri nalichii aktivnykh pomekh [Method of improving reception in a wireless data transmission system based on antenna arrays in the presence of active interference], *Tr. mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyaniye EVM - IREMV»* [Proceedings of the international scientific conference "Radiation and scattering of computers - IREMV"]. Taganrog: TTI YuFU, 2009, pp. 412-515.
7. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Sravnitel'naya effektivnost' besprovodnogo dostupa na osnove prostranstvennoy adaptatsii na vykhodakh antennoy reshetki pri ispol'zovanii MIMO-OFDM v releevskom kanale svyazi [Comparative efficiency of wireless access based on spatial adaptation at antenna array outputs when using MIMO-OFDM in a relay communication channel], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10 (197), pp. 45-49.
8. Fedosov V.P., Muravitskiy N.S. Adaptivnaya priemnaya antennaya reshetka dlya obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov v MIMO-sisteme besprovodnoy peredachi dannykh [Adaptive receiving antenna array for processing space-time signals in a MIMO wireless data transmission system], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 8, pp. 35-43.
9. Xirouchakis I.A. Spatial Channel Model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) Simulations A Ray Tracing Simulator Based on 3GPP TR 25.996 v. 6.1. 0, *Physics Department, University of Athens*, 2008.
10. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm based on antenna arrays for radio communication systems, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 301-312.
11. Fedosov V.P. Algoritmy sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennoykh reshetok pri nalichii aktivnykh pomekh [Algorithms for joint adaptation to reception and transmission in a communication system based on antenna arrays in the presence of active interference], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences].
12. Fedosov V.P., Ternovoy D.O. Algoritm sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennoykh reshetok [Algorithm of joint adaptation to reception and transmission in a communication system based on antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2011, No. 9, pp. 52-55.
13. Fedosov V.P., Romanov V.A. Statisticheskaya radiotekhnika: elektronnoe uchebnoe posobie [Statistical radio engineering: an electronic teaching aid]. Rostov-on-Donu, 2008.
14. Fedosov V., Jameel J., and Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, pp. 012131.
15. Fedosov V.P., Jameel J.S., and Kucheryavenko S.V. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2021. – P. 443-446.
16. Fedosov V., Legin A., and Lomakina A. Algorithms based on MIMO-OFDM technology for realization of digital hydroacoustic communication channel, *Izvestiya SfedU, Engineering Sciences*, 2015, Vol. 168, pp. 148-158.
17. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. – John Wiley & Sons, 2010.
18. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Three-dimensional model of hydro acoustic channel for research MIMO systems, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9. Ocean Sensing and Monitoring IX*, 2017, pp. 101860W.
19. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Data transmission in 3D WiMAX channel based on SISO-OFDM and MIMO-OFDM, *Izvestiya SFedU. Engineering*, 2020, No. 6 (216), pp. 6-18. (In Russian).
20. Fedosov V.P., Al'-Musavi Visam Mokhammedtaki M. Dzhavad, Kucheryavenko S.V. Prostranstvenno-vremennoy adaptivnyy algoritm s ispol'zovaniem koda Khemminga na osnove modeli bes-provodnogo kanala 3D-MIMO [A space-time adaptive algorithm using a Hamming code based on a 3D-MIMO wireless channel model], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2024, Vol. 88, No. 2, pp. 113-123.
21. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Medical Image Transmission in 3D WiMAX Channel Using Adaptive Algorithm Based on MIMO-OFDM Principles, *Conference Proceedings - 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023*, 2023, pp. 236-239.
22. Fedosov V., Lomakina A., Legin A., Voronin V. Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels, *Book Modeling of systems wireless data transmission based on antenna arrays in underwater acoustic channels. International Society for Optics and Photonics*, 2016, pp. 98720G.

23. *Kucheryavenko A., Fedosov V.* Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB, *MATEC Web of Conferences*, 2017, pp. 05008.
24. *Fedosov V., Legin A.* Wireless Data Transmission in Underwater Hydroacoustic Environment Based on MIMO-OFDM System and Application Adaptive Algorithm at the Receiver Side, *Serbian journal of electrical engineering*, February 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 71-83.
25. *Fedosov V.P., Dzhamil D.S., Kucheryavenko S.V.* Sravnenie proizvoditel'nostey adaptivnogo algoritma i metoda minimuma srednekvadraticeskogo otkloneniya dlya peredachi izobrazheniy na osnove sistem svyazi s ispol'zovaniem antennykh reshetok [Comparison of the performance of the adaptive algorithm and the method of minimum standard deviation for image transmission based on communication systems using antenna arrays], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2023, Vol. 87, No. 2, pp. 69-78.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; профессор.

Циркуленко Артемий Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: acirkulenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – Southern Federal University; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; professor.

Tsirkulenko Artemy Viktorovich – Southern Federal University; almusavi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; postgraduate student.