

**Bereza Denis Alexandrovich** – Southern Federal University; e-mail: dbereza@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; postgraduate student.

**Gladkov Leonid Anatol'evich** – Southern Federal University; e-mail: lagladkov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; professor.

**Gladkova Nadezhda Viktorovna** – Southern Federal University; e-mail: nvgladkova@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; senior teacher.

УДК.681.1

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-37-45

**В.П. Федосов, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, С.В. Кучерявенко**  
**АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КАНАЛЕ 3D WIMAX НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ SIMO-OFDM**

*Развитие телекоммуникационной отрасли сосредоточено на использовании систем беспроводной широкополосной связи, позволяющих увеличить скорость передачи информации. Для решения этой задачи разработаны новые технологии с высокими передающими способностями. Ограничение спектра сигнала и замирание сигнала в зонах Френеля из-за многопутных компонентов в беспроводной системе, развернутой в городских кварталах с плотной застройкой, представляют собой значительные проблемы при проектировании систем беспроводной связи, а также появление эффекта Доплера в результате движения мобильной станции и затухание сигнала при распространении в канале в различных частотных диапазонах. Чтобы увеличить скорость и пропускную способность, можно использовать процедуру передачи и приема сигналов для формирования каналов с одним входом и несколькими выходами SIMO (Single Input Multiple Output), обеспечивающих пространственную фильтрацию при выборе пути с максимальной мощностью сигнала. В статье представлен анализ и моделирование передачи данных на основе системы SIMO беспроводного канала 3D WiMAX. Результаты сравнения обработки сигналов этим методом с использованием адаптивного алгоритма и без него, полученный по критерию максимума отношения сигнал/шум (SNR – Signal to Noise Ratio) представлены зависимостями вероятности появления битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) от отношения сигнал/шум (SNR). В результате моделирования был сделан вывод, что для одной и той же системы вероятность ошибки чувствительна к изменению типа модуляции, иными словами, BER изменяется в соответствии с изменением вида модуляции сигнала. Также можно сделать вывод, что системы SIMO чувствительны к многопутному распространению сигнала (multipath) для одного и того же типа модуляции, а BER растет с увеличением количества приемников поскольку снижается отношение сигнал/шум SNR.*

*SIMO – Single Input Multiple Output; MIMO – Multiple Input – Multiple Output – MIMO; вероятность битовых ошибок BER – Bit Error Rate; OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, многопутность.*

**V.P. Fedosov, AL-Musawi Wisam Mohammedtaqi M. Jawad, S.V. Kucheryavenko**  
**ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIAL-TEMPORAL SIGNALS FOR DATA TRANSMISSION IN 3D WIMAX CHANNEL BASED ON SIMO-OFDM PRINCIPLES**

*The development of the telecommunications industry is focused on the use of wireless broadband communication systems that allow increasing the speed of information transfer. New technologies with high transmission capabilities have been developed to solve this problem. Limitation of the signal spectrum and signal fading in Fresnel zones due to multipath components in a wireless system deployed in densely built-up urban areas are significant problems in the design of wireless communication systems, as well as the occurrence of the Doppler effect due to the movement of the mobile station and signal attenuation during propagation in the channel in different frequency ranges. To increase the speed and throughput, it is possible to use the procedure of transmitting and receiving signals to form channels with one input and several outputs SIMO (Single Input Multiple Output), providing spatial filtering when choosing the path with the maximum signal power. The article presents the analysis and modeling of data transmis-*

*sion based on the SIMO system of the 3D WiMAX wireless channel. The results of comparison of signal processing by this method with and without the adaptive algorithm, obtained by the criterion of maximum signal-to-noise ratio (SNR) are presented by the dependences of the probability of occurrence of a bit error (BER) on the signal-to-noise ratio (SNR). As a result of modeling, it was concluded that for the same system, the probability of error is sensitive to a change in the modulation type, in other words, BER changes in accordance with a change in the type of signal modulation. It can also be concluded that SIMO systems are sensitive to multipath signal propagation for the same modulation type, and BER increases with an increase in the number of receivers since the signal-to-noise ratio SNR decreases.*

*SIMO – Single Input Multiple Output; MIMO – Multiple Input – Multiple Output – MIMO; BER – Bit Error Rate; OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing; multipath.*

**Введение.** Основная проблема, с которой сталкиваются системы беспроводной связи, это замирание из-за многопутного распространения, вызванное переотражениями передаваемого сигнала в городских условиях с плотной застройкой. При использовании систем с одним входом и множеством выходов (SIMO) разнесенные приемники извлекают несколько путей одного и того же сигнала, полученного из разных каналов, и применяют схемы объединения [1, 2].

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) это широко применяемый метод беспроводной связи, который делит спектр на несколько равномерно расположенных подканалов и передает часть пользовательской информации по каждому каналу параллельно и независимо друг от друга [3]. На приемной стороне сигнал на одной частоте может частично коррелировать с принятой огибающей на другой частоте из-за замираний вследствие многопутного распространения переданных сигналов. Эта корреляция обусловлена разницей во временных задержках распространения сигнала сообщения, связанных с рассеянием волн, составляющих общий сигнал [4]. Традиционное решение проблемы многолучевого распространения – сложный эквалайзер приемника, выполняющий выравнивание данных во временной или частотной области. Важным, но простым способом борьбы с многолучевым распространением является применение модуляции OFDM, которая использует относительно простую цифровую обработку сигналов [5, 6]. Разброс во времени прибытия, известный как разброс задержки, приводит к перекрытию передаваемых импульсов данных, что приводит к межсимвольным искажениям. Из-за импульсного характера канала Рэля несколько соседних символов могут быть уничтожены во время затухания [7, 8]. Когда ортогональность между поднесущими ухудшается, это вызывает помехи между несущими, и когда принимается серия символов, между последовательными символами OFDM возникают межсимвольные искажения. На входе приемника из-за нестабильности работы синхронизирующего генератора и разницы в тактовых частотах приемника и передатчика, у принятой выборки символов сообщения возникают ошибки синхронизации [9, 10].

Сочетание методов OFDM и SIMO в одной системе повышает спектральную эффективность и надежность линии связи без увеличения мощности передачи или расширения полосы пропускания. При реализации метода доступа SIMO-OFDM в беспроводной системе связи необходимы новые подходы к синхронизации времени и частоты, выравниванию и оценке параметров канала.

Недавно сообщалось о величине ошибок синхронизации из-за несовершенной синхронизации времени [6]. Однако ошибки временной синхронизации ухудшают характеристики приемника OFDM из-за введения перекрестных помех между несущими частотами и межсимвольной интерференции. О методах восстановления синхронизации кадров сообщается в [11]. Недавно сообщалось о влиянии синхронизации кадров на систему OFDM с пилот-сигналом и об аналитической формулировке для оценки ошибки синхронизации в системе OFDM [12], где определяется влияние ошибки синхронизации на отношение сигнал/шум. Результаты производительности по частоте ошибок по битам (BER) для системы передачи OFDM с учетом совокупного влияния шума приемника, многопутного рэлеевского замирания в канале мобильной связи и ошибки синхронизации из-за несовершенной синхронизации времени представлены в [13].

В этой статье представлен аналитический подход к оценке производительности системы SIMO-OFDM с учетом влияния ошибки синхронизации тактовых частот. Результаты производительности оцениваются с использованием вероятности ошибки приема BER от величины отношения сигнал/шум в децибелах.

**Модель системы SIMO-OFDM.** Модель системы OFDM состоит из преобразования потоков двоичных данных в комплексные символы посредством модуляции. Затем данные передаются в кадрах посредством последовательно-параллельного преобразования. Служебные пилотные символы вставляются в каждый кадр данных, который модулируется поднесущими посредством ОДПФ (обратного дискретного преобразования Фурье). Эти пилот-символы вставляются для синхронизации передачи символов сообщения в канале. ОДПФ используется для преобразования последовательности спектральных данных  $X(k)$  в сигнал во временной области  $x(n)$  следующим образом:

$$x(n) = \text{ОДПФ}_N\{X(k)\} = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

где  $N$  – размерность преобразования Фурье и количество поднесущих.

Далее один защитный интервал вставляется между каждыми двумя символами OFDM, чтобы устранить межсимвольную интерференцию (ISI). Это защитное время включает в себя циклически расширенную часть символа OFDM, чтобы сохранить ортогональность и устранить помехи между несущими (ICI) [14].

Таким образом, для системы OFDM, содержащей  $N$  поднесущих, которые занимают полосу пропускания  $B$ , каждый символ OFDM передается во времени  $T$ . Каждые две соседние поднесущие расположены на расстоянии  $\delta f = 1$ . Выходной сигнал OFDM преобразуется в последовательный сигнал с помощью параллельно-последовательного преобразователя. Процесс белого гауссовского шума  $(0, \sigma_w^2)$  со спектральной плотностью мощности  $N_0/2$  добавляется через частотно-избирательный канал с изменяющимся во времени многопутным замиранием.

В среде распространения также может присутствовать импульсный шум, и тогда канал становится нелинейным с негауссовым импульсным шумом. Импульсный шум может существенно влиять на производительность системы связи OFDM по многим причинам. Во-первых, время прихода импульса непредсказуемо, формы импульсов неизвестны и значительно различаются. Более того, импульсы обычно имеют очень большие пиковые значения и, следовательно, большую энергию, которая может значительно превосходить энергию полезного сигнала [15] и уменьшать отношение сигнал/шум.

Импульсный шум моделируется как процесс Бернулли-Гаусса и генерируется с помощью функции процесса Бернулли-Гаусса, как объединение случайного процесса с гауссовым распределением  $w(n)$  и случайного процесса  $\lambda(n)$  с законом вероятности [16]:

$$P_r(\lambda(n)) = \begin{cases} p & \lambda = 1 \\ 1 - p & \lambda = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $\lambda$  – случайная величина в виде единичного импульса,  $p$  – вероятность появления случайного единичного импульса,  $n$  – размерность анализируемой последовательности импульса.

В приемнике, после удаления защитного интервала, дискретный базовый OFDM-сигнал для системы, включающей импульсный шум, равен:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)H(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + w(n) + \lambda(n), \quad 0, \dots, N-1, \quad (3)$$

где последовательность  $y(n)$  – является выборкой принимаемого сигнала во временной области,  $H(k) = \text{ОДПФ}(n)$  – частотная характеристика канала на  $k$ -х частотах. Сумма составляющих гауссовского шума и импульсного шума составляет общий шум, определяемый выражением  $z(n) = w(n) + \lambda(n)$ .

Пусть  $\Omega_p$  подмножество  $N_p$  пилотных поднесущих и  $\Delta_p$  – пилот-интервал в частотной области. По этому подмножеству можно оценить частотную характеристику канала, а затем интерполировать ее по другим поднесущим ( $N - N_p$ ). Систему OFDM можно выразить как

$$y(n) = y^P(n) + y^D(n) + z(n) \quad (4)$$

$$y(n) = \sum_{k \in \{\Omega_p\}} X^P(k)H(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + \sum_{k \in \{\Omega_p\}} X^D(k)H(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + z(n), \quad (5)$$

где  $X^P(k)$  и  $X^D(k)$  представляют собой комплексный пилот-сигнал и символ данных соответственно, передаваемые на  $k$ -ой частоте. Вставка пилот-сигнала в поднесущие каждого символа OFDM должна удовлетворять требованиям теории выборки и равномерного распределения [17].

После прямого дискретного преобразования Фурье ДПФ выборка  $X(n)$  становится равна:

$$X(n) = \text{ДПФ}_N\{y(k)\} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (6)$$

Эта выборка является результатом частотно-временного выравнивания в каналах приемной системы.

Импульсную характеристику модели канала распространения с частотно-селективным замиранием, можно записать как:

$$h(\tau, t) = \sum_{i=0}^{L-1} h_i(t)\delta(t - \tau_i), \quad (7)$$

где  $h_i(t)$  – импульсная характеристика, представляющая комплексное затухание канала,  $\tau_i$  – случайная задержка на выбранном пути распространения,  $L$  – количество путей распространения.

На рис. 1 представлена схема модели системы SIMO-OFDM с  $N_R$  приемными антеннами. В передатчике поток данных делится на блоки длиной  $N$  в формирователе блоков (ФБ). Для каждого блока применяется обратное преобразование Фурье (ОДПФ) для преобразования данных во временную область. Затем к каждому блоку добавляется циклический префикс (ЦП). Потом блоки временной области последовательно передаются по каналу с многопутным распространением, избирательному по времени и частоте. В приемнике циклический префикс удаляется и выполняется коррекция во временной или частотной области, а также прямое преобразование Фурье ДПФ для извлечения переданных блоков.

В структуре модели системы блок эквалайзера (Э) выполняет коррекцию во временной или частотной области, также учитывается добавление шума канала распространения  $z(n)$  [17].

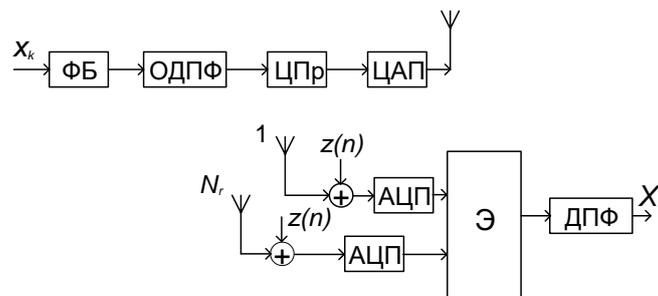


Рис. 1. Модель системы SIMO-OFDM

В рассматриваемой системе SIMO-OFDM расположение приемных антенн разнесено в пространстве, например, на мачте приемные антенны закреплены на расстоянии в несколько метров друг от друга. Это сделано с целью приема одного и того же сигнала сообщения с разных путей с дальнейшим выбором принятого сигнала с максимальным соотношением сигнал/шум, что обеспечивает большую производительность и помехоустойчивость системы.

Представляет интерес результат применения различных типов модуляции совместно с разработанным адаптивным алгоритмом пространственно-временной обработки сигналов [2, 4, 5] для системы SIMO-OFDM.

**Результаты моделирования.** Компьютерное моделирование использовано для оценки эффективности применения адаптивного алгоритма пространственно-временной обработки для разных типов модуляции переданного сигнала.

Для передающей системы базовой станции и приемных систем мобильной станции была выбрана несущая частота 2,5 ГГц, обеспечивающая умеренное затухание сигнала для выбранного диапазона беспроводной связи. Расстояние и координаты расположения базовой и мобильных станций выбираются исходя из предполагаемой работы системы связи на корпусной мачте высотой 90 м и удаленности передающей и принимающих антенн в 20 км при условиях городской застройки для 3D-модели канала [18].

Предполагается, что базовая станция неподвижна и находится в фиксированном положении, в то время как мобильная станция движется с постоянной скоростью  $V = 40$  км/ч.

На рис. 2 показана зависимость уменьшения вероятности ошибочного приема BER символов сигнала сообщения от величины отношения сигнал/шум принятого сигнала для исследованных типов модуляции BPSK (Binary Phase-Shift Keying – двоичная фазовая модуляция), QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying – квадратурная фазовая модуляция), 8-PSK (8 - Phase-Shift Keying – восьмеричная фазовая модуляция), 16-QAM (16 - Quadrature Amplitude Modulation – шестнадцатеричная квадратурная модуляция).

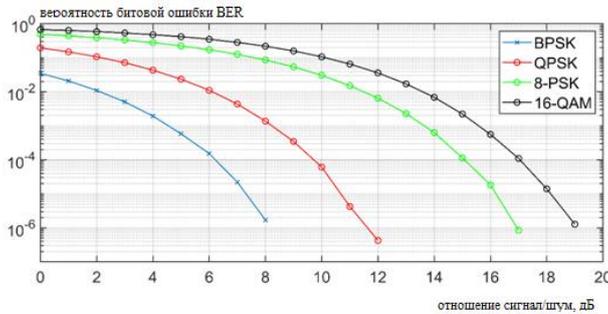


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для системы SIMO-OFDM без использования адаптивного алгоритма при различных типах модуляции

На рис. 3 показана зависимость уменьшения вероятности ошибочного приема BER от величины отношения сигнал/шум принятого сигнала для тех же типов модуляции, но исследование проведено с применением адаптивного алгоритма пространственно-временной обработки сигналов.

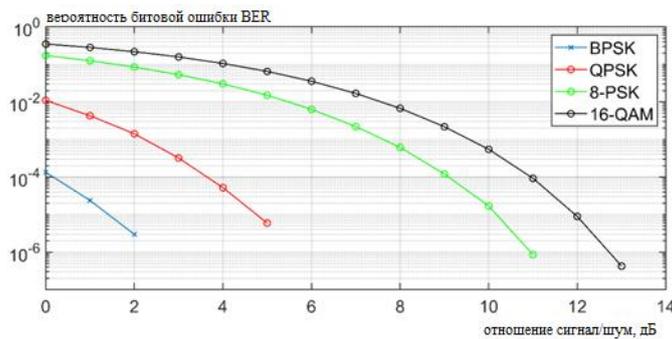


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для системы SIMO-OFDM с использованием адаптивного алгоритма при различных типах модуляции

Полученные результаты возникновения битовой ошибки при фиксированном значении отношения сигнал/шум в 2 дБ представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Значение вероятности битовой ошибки при различных типах модуляции для системы SIMO-OFDM**

модуляция \ алгоритм	BPSK	QPSK	8-PSK	16-QAM
без адаптивного алгоритма	$10^{-2}$	$10^{-1}$	4	6
с адаптивным алгоритмом	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-2}$	2,5

Результаты, представленные в табл. 1, показывают, что для системы SIMO-OFDM существенное уменьшение вероятности появления битовой ошибки получается при применении модуляции BPSK совместно с алгоритмом адаптации или без него. Минимальное значение вероятности битовой ошибки получается при совместном применении алгоритма адаптации и типа модуляции BPSK.

Самое большое значение вероятности битовой ошибки получено при анализе применения типа модуляции 16-QAM.

Для всех исследованных типов модуляции вероятность битовой ошибки BER в передаваемом сообщении существенно снижается при использовании алгоритма адаптации.

**Заключение.** В этой статье проведены анализ и моделирование передачи данных на основе системы SIMO-OFDM беспроводного канала 3D WiMAX с применением алгоритма адаптации для различных типов модуляции.

Результат моделирования показал, что вероятность битовой ошибки при приеме сигналов чувствительна к изменению типа модуляции для одной и той же системы, вероятность битовой ошибки изменяется из-за изменений в типе модуляции. При использовании алгоритма адаптивной обработки в SIMO-OFDM, вероятность битовой ошибки снижается для всех типов модуляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Roy R.K., Roy T.K. Evaluation of Antenna Receive Diversity Performance of SIMO-OFDM System over Rayleigh Fading Channel // Computer Science and Applications. – 2013. – 4 (7).
2. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO-OFDM technique // Conference Proceedings - 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2017. – 2017. – P. 218-221.
3. Sadjadpour H.R. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) // Handbook of Radio Frequency and Wireless Technologies. – Elsevier, 2004. – P. 333-353.
4. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model // Book Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model. – IEEE, 2021. – P. 443-446.
5. Федосов В.П., Аль-Мусафи Висам Мохаммедтаки М. Джавад. Анализ и сравнение адаптивного алгоритма в системах SISO и MIMO для канала 3D-WiMAX в условиях функционирования беспилотных летательных средств в районе с плотной застройкой // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2023): Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Т. 1. – Таганрог, 2023. – С. 50-56.
6. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles // Book Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles. – IOP Publishing, 2021. – P. 012131.
7. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Theoretical Analysis of Adaptive Algorithm Modulation Scheme in 3D OFDM WiMAX System // Trends in Sciences. – 2022. – No. 19.12. – P. 4605-4605.
8. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for wireless data transmission (including images) based on SISO system and OFDM technique // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 15, No. 3. – P. 353-364.

9. Джамил Д.С. Передача информации на основе канала MIMO-OFDM 3D WiMAX с использованием адаптивного алгоритма // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов. – Томск, 2021. – С. 107-112.
10. 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. – 2020. – No. 6 (216). – P. 6-18. (In Russian).
11. Fedosov V., Al-Musawi W., Kucheryavenko S. Transmission Data in 3D Channel Using Adaptive Algorithm Based on The MIMO-OFDM in a Densely Built-Up Area // in 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2023). – 2023. – P. 240-243.
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., Ковтун Д.Г., Лegin А.А., Ломакина А.В. Исследование модели OFDM-сигнала с малым уровнем внеполосного излучения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 11 (172). – С. 6-16.
14. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в MIMO-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8 (171). – С. 35-43.
15. 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.
16. Finamore W.A., da Silva Pinho M., Sharma M., Ribeiro M.V. Modeling Noise as a Bernoulli-Gaussian Process // Journal of Communication and Information Systems. – 2023. – 38, (1). – P. 174-186.
17. Beheshti M., Omidi M.J., Doost-Hoseini A.M. Equalisation of SIMO-OFDM systems with insufficient cyclic prefix in doubly selective channels // IET Commun. – 2009. – Vol. 3, Issue 12. – P. 1870-1882.
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. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решетки при использовании MIMO OFDM в релейском канале // Антенны. – 2013. – № 10 (197). – С. 045-049.
20. Федосов В.П., Кучерявенко С.В., Муравицкий Н.С. Повышение эффективности радиосвязи в релейском канале на основе антенных решеток // Антенны. – 2008. – № 11 (138). – С. 98-104.
21. 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-MIMO // Радиотехника. – 2024. – Т. 88, № 2. – С. 113-123.
22. 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.
23. 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.
24. Kucheryavenko A., Fedosov V. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB // MATEC Web of Conferences. – 2017. – P. 05008.
25. 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.

## REFERENCES

1. Roy R.K., Roy T.K. Evaluation of Antenna Receive Diversity Performance of SIMO-OFDM System over Rayleigh Fading Channel, *Computer Science and Applications*, 2013, 4 (7).
2. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO-OFDM technique, *Conference Proceedings - 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2017*, 2017, pp. 218-221.
3. Sadjadpour H.R. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), *Handbook of Radio Frequency and Wireless Technologies*. Elsevier, 2004, pp. 333-353.
4. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model, *Book Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model*. IEEE, 2021, pp. 443-446.

5. Fedosov V.P., Al'-Musavi Visam Mokhammedtaki M. Dzhavad. Analiz i sravnenie adaptivnogo algoritma v sistemakh SISO i MIMO dlya kanala 3D-WiMAX v usloviyakh funktsionirovaniya bespilotnykh letatel'nykh sredstv v rayone s plotnoy zastroykoy [Analysis and comparison of adaptive algorithm in SISO and MIMO systems for 3D-WiMAX channel under conditions of unmanned aerial vehicles operation in densely populated areas], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii (KomTekh-2023): Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Computer and information technologies in science, engineering and management (KomTech-2023). Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation], Vol. 1. Taganrog, 2023, pp. 50-56.
6. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles, *Book Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles*. IOP Publishing, 2021, pp. 012131.
7. Fedosov V.P., Jameel J.S., Kucheryavenko S.V. Theoretical Analysis of Adaptive Algorithm Modulation Scheme in 3D OFDM WiMAX System, *Trends in Sciences*, 2022, No. 19.12, pp. 4605-4605.
8. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for wireless data transmission (including images) based on SISO system and OFDM technique, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 353-364.
9. Dzhamil D.S. Peredacha informatsii na osnove kanala MIMO-OFDM 3D WiMAX s ispol'zovaniem adaptivnogo algoritma [Information transmission based on MIMO-OFDM 3D WiMAX channel using adaptive algorithm], *Nauchnaya initsiativa inostrannykh studentov i aspirantov* [Scientific initiative of foreign students and postgraduates]. Tomsk, 2021, pp. 107-112.
10. 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*, 2020 No. 6 (216), pp. 6-18. (In Russian).
11. 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*, 2020, No. 6 (216), pp. 6-18. Fedosov V., Al-Musawi W., Kucheryavenko S. Transmission Data in 3D Channel Using Adaptive Algorithm Based on The MIMO-OFDM in a Densely Built-Up Area, in *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2023)*, 2023, pp. 240-243.
12. Fedosov, V.P., Ternovoy, D.O. Algoritm sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennykh reshetok [Algorithm for joint adaptation for reception and transmission in a communication system based on antenna arrays], *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering], 2011, No. 9, pp. 52-55.
13. Fedosov V.P., Kovtun D.G., Legin A.A., Lomakina A.V. Issledovanie modeli OFDM-signala s malym urovнем vnepolosnogo izlucheniya [Study of an OFDM signal model with a low level of out-of-band radiation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 11 (172), pp. 6-16.
14. 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 spatio-temporal signals in a MIMO wireless data transmission system], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 8 (171), pp. 35-43.
15. 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 an adaptive algorithm and a minimum mean square deviation method for image transmission based on communication systems using antenna arrays], *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering], 2023, Vol. 87, No. 2, pp. 69-78.
16. Finamore W.A., da Silva Pinho M., Sharma M., Ribeiro M.V. Modeling Noise as a Bernoulli-Gaussian Process, *Journal of Communication and Information Systems*, 2023, 38, (1), pp. 174-186.
17. Beheshti M., Omid M.J., Doost-Hoseini A.M. Equalisation of SIMO-OFDM systems with insufficient cyclic prefix in doubly selective channels, *IET Commun*, 2009, Vol. 3, Issue 12, pp. 1870-1882.
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., 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 [Comparative efficiency of wireless access based on spatial adaptation at the outputs of the antenna array using MIMO OFDM in the Rayleigh channel], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10 (197), pp. 045-049.
20. Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V., Muravitskiy N.S. Povyshenie effektivnosti radiosvyazi v releevskom kanale na osnove antennykh reshetok [Increasing the efficiency of radio communication in the Rayleigh channel based on antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11 (138), pp. 98-104.

21. Fedosov V.P., Al'-Musavi Visam Mokhammedtaki M. Dzhavad, Kucheryavenko S.V. Prostranstvenno-vremennoy adaptivnyy algoritm s ispol'zovaniem koda KХemminga na osnove modeli besprovodnogo kanala 3D-MIMO [Spatio-temporal adaptive algorithm using the Hamming code based on the 3D-MIMO wireless channel model], *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering], 2024, Vol. 88, No. 2, pp. 113-123.
22. 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.
23. 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.
24. Kucheryavenko A., Fedosov V. Model of multicomponent micro-Doppler signal in environment MATLAB, *MATEC Web of Conferences*, 2017, pp. 05008.
25. 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.

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

**Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад** – Южный федеральный университет; e-mail: almusavi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Кучерявенко Светлана Валентиновна** – Южный федеральный университет; e-mail: svkucheryavenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

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

**Al-Musawi Wisam Mohammedtaqi M. Jawad** – Southern Federal University; e-mail: almusavi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; postgraduate student.

**Kucheryavenko Svetlana Valentinovna** – Southern Federal University; e-mail: svkucheryavenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; associate professor.

УДК 004.832.23

DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-45-56

**С.И. Родзин, А.И. Дерменжи**

### **ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЙ В ПОПУЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕТРОПОЛИСА–ГАСТИНГСА**

*Наиболее важными задачами принятия оптимальных решений с использованием эвристических алгоритмов считаются повышение точности и предотвращение преждевременной сходимости. Большинство исследований в этом направлении сосредоточено на разработке новых операторов, настройке параметров популяционной метаэвристики и гибридизации нескольких стратегий поиска решений. Гораздо меньше внимания уделяется инициализации – важной операции в популяционных алгоритмах, которая связана с созданием исходной популяции решений. Предлагается новый подход к инициализации популяции для эвристических алгоритмов. При формировании множества начальных решений предлагается использовать метод Метрополиса–Гастингса. В соответствии с этим методом исходные решения в популяции принимают значения, близкие к глобальному или локальным оптимумам целевой функции. Это позволяет повысить точность получаемых решений. Чтобы продемонстрировать возможности предлагаемого подхода к инициализации, он была встроена в базовый алгоритм дифференциальной эволюции. Для оценки эффективности стратегии проведена экспериментальная проверка путем сравнения с такими известными методами как случайная инициализация, обучение на основе методов оппозиции и хаоса, а также метода диагонального равномерного распределения. Сравнение проводилось на репрезен-*