

22. Yi J., Tang J., Yuan F., Qiao G., Dai D. Non-Uniform Clustering Algorithm for UWSNs Based on Energy Equalization Non-Uniform Clustering Algorithm for UWSNs Based on Energy Equalization, *Sensors*, 2023, 23, 5466. Available at: <https://doi.org/10.3390/s23125466>.
23. Tian K., Zhou C., Zhang J. Improved LEACH Protocol Based on Underwater Energy Propagation Model, Parallel Transmission, and Replication Computing for Underwater Acoustic Sensor Networks, *Sensors*, 2024, 24, 556. Available at: <https://doi.org/10.3390/s24020556>.
24. Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996, 656 p.
25. Thorp W.H. Deep Sound Attenuation in the Sub and Low Kilocycle per-second Range, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1965, Vol. 38, pp. 648-654.
26. Cui J.-H., Kong J., Gerla M., Zhou S. The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications, *IEEE Network*, 2006, Vol. 20, No. 3, pp. 12-18. Available at: <https://doi.org/10.1109/MNET.2006.1637927>.
27. Mosqueda-Arvizu C.-A., Romero-González J.-A., Córdova-Esparza D.-M., Terven J. Chaparro-Sánchez R., Rodríguez-Reséndiz J. Logical Execution Time and Time-Division Multiple Access in Multicore Embedded Systems: A Case Study, *Algorithms*, 2024, 17, 294. Available at: <https://doi.org/10.3390/a17070294>.

**Маевский Андрей Михайлович** – АО НПП ПТ «Океанос»; e-mail: [maevskiy\\_andrey@mail.ru](mailto:maevskiy_andrey@mail.ru); г. Санкт-Петербург, Россия; к.т.н.; н.с.; руководитель отдела морской робототехники СПбГМТУ.

**Рыжов Владимир Александрович** – СПбГМТУ; e-mail: [ryzhov@smtu.ru](mailto:ryzhov@smtu.ru); г. Санкт-Петербург, Россия; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой ПМИММ.

**Федорова Татьяна Александровна** – СПбГМТУ; e-mail: [fedorova.tan@gmail.com](mailto:fedorova.tan@gmail.com); г. Санкт-Петербург, Россия; к.ф.-м.н.; доцент кафедры ПМИММ.

**Кожемякин Игорь Владиленович** – СПбГМТУ; e-mail: [1861vp@mail.ru](mailto:1861vp@mail.ru); г. Санкт-Петербург, Россия; начальник Управления оборонных исследований и разработок СПбГМТУ.

**Буров Никита Михайлович** – ГУАП; e-mail: [burov.nm@yandex.ru](mailto:burov.nm@yandex.ru); г. Санкт-Петербург, Россия; студент.

**Maevsky Andrey Mikhailovich** – “Oceanos” JSC; e-mail: [maevskiy\\_andrey@mail.ru](mailto:maevskiy_andrey@mail.ru); Saint Petersburg, Russia; cand. of eng. sc.; researcher; head of marine department SMTU.

**Ryzhov Vladimir Alexandrovich** – SMTU; e-mail: [ryzhov@smtu.ru](mailto:ryzhov@smtu.ru); Saint Petersburg, Russia; dr. of eng. sc.; professor; head of AM&MM Department.

**Fedorova Tatiana Aleksandrovna** – SMTU; e-mail: [fedorova.tan@gmail.com](mailto:fedorova.tan@gmail.com); Saint Petersburg, Russia; cand. of phys and math. sc.; associate professor of AM&MM Department.

**Kozhemyakin Igor Vladilenovich** – SMTU; e-mail: [1861vp@mail.ru](mailto:1861vp@mail.ru); Saint Petersburg, Russia; head of Division Defense Research and Development.

**Burov Nikita Michailovich** – GUAP; e-mail: [burov.nm@yandex.ru](mailto:burov.nm@yandex.ru); Saint Petersburg, Russia; student.

УДК 681.1

DOI 10.18522/2311-3103-2025-3-81-90

**В.П. Федосов, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М. Джавад, С.В. Кучерявенко**  
**АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ С КОДИРОВАНИЕМ РИДА-СОЛОМОНА ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА РАДИОСВЯЗИ**

*Уменьшение вероятности возникновения ошибок при передаче сообщений имеет значение в спутниковых, беспроводных и космических системах связи. Уменьшение вероятности битовых ошибок в беспроводной системе связи возможно при применении кодирования отправляемых данных. Использование канального кодирования позволяет обнаружить и исправить ошибки при передаче сообщения в зашумленном канале. Целью работы является исследование влияния применения кодов Рида-Соломона и алгоритма пространственно-временной обработки сигналов в прием-*

нике с использованием адаптивной антенной решетки на повышение помехоустойчивости в беспроводных системах радиосвязи. При наличии сложных путей распространения сигнала это позволяет выполнять пространственную фильтрацию в каналах с отражениями. Метод адаптации, рассматриваемый в этой статье, основан на теории векторов и собственных значений пространственной корреляционной матрицы. Для кодов Рида-Соломона результаты моделирования показывают значительное уменьшение показателей битовой ошибки за счет исправления ошибок передачи. Используя совместно адаптивные алгоритмы для систем «один вход – множественный выход» с мультиплексированием с ортогональным частотным разделением каналов (SIMO-OFDM) и систем «множественный вход – множественный выход» с мультиплексированием с ортогональным частотным разделением каналов MIMO-OFDM и код Рида-Соломона для передаваемого сообщения, достигнуто увеличение отношения сигнал/шум для фиксированного уровня битовой ошибки до значений 8 дБ и 5 дБ соответственно. Результаты показывают, что адаптивный алгоритм с одновременным применением кода Рида-Соломона может увеличить пропускную способность при одновременном значительном снижении вероятности ошибки. В условиях многопутного распространения сигнала можно утверждать, что использование адаптивных пространственно-временных алгоритмов улучшает помехоустойчивость приемной системы при обработке сигналов.

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

**V.P. Fedosov, AL-Musawi Wisam Mohammedtaqi M.Jawad, S.V. Kucheryavenko**  
**ADAPTIVE ALGORITHM FOR PROCESSING SPATIAL-TEMPORAL SIGNALS**  
**WITH REED-SOLOMON CODING FOR A THREE-DIMENSIONAL MODEL**  
**OF A WIRELESS RADIO COMMUNICATION CHANNEL**

*Reducing the probability of errors in message transmission is important in satellite, wireless and space communication systems. Reducing the probability of bit errors in a wireless communication system is possible by using encoding of the data being sent. Using channel encoding allows detecting and correcting errors in message transmission in a noisy channel. The aim of the work is to study the effect of using Reed-Solomon codes and the algorithm of space-time signal processing in a receiver using an adaptive antenna array on increasing noise immunity in wireless radio communication systems. In the presence of complex signal propagation paths, this allows performing spatial filtering in channels with reflections. The adaptation method, considered in this paper, is based on the theory of vectors and eigenvalues of the spatial correlation matrix. For Reed-Solomon codes, the simulation results show a significant decrease in bit error rates due to the correction of transmission errors. By using adaptive algorithms for single-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing (SIMO-OFDM) and multiple-input multiple-output MIMO-OFDM systems together with the Reed-Solomon code for the transmitted message, the signal-to-noise ratio for a fixed bit error level was increased to 8 dB and 5 dB, respectively. The results show that the adaptive algorithm with simultaneous use of the Reed-Solomon code can increase the throughput while significantly reducing the error probability. Under conditions of multipath signal propagation, it can be argued that the use of adaptive space-time algorithms improves the noise immunity of the receiving system during signal processing.*

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

**Введение.** Коммуникация – это процесс установления соединения или связи между двумя точками информации или базовый процесс обмена информацией. Электронное оборудование, которое используется для целей коммуникации, называется системой связи. Основная цель этой системы – передавать информационный несущий сигнал от источника, расположенного в одной точке, к пользователю или получателю, расположенному в другой точке на некотором расстоянии [1, 2].

Для цифровой передачи и хранения данных, стандарт BER (Bit Error Rate – вероятность битовых ошибок) обычно используется при оценке производительности. Оценивается количество битов, принятых ошибочно по сравнению с общим количеством переданных битов. Искажение данных происходит из-за шума в канале передачи. Отношение сигнал/шум (CNR – Signal to Noise Ratio) определяется мощностью сигнала по отношению к

шуму и обратно пропорционально BER. [3]. Это означает, что чем меньше результат BER, тем выше SNR и лучше качество связи. Из-за появления шума при прохождении сигнала через канал AWGN (Additive White Gaussian Noise – аддитивный белый гауссовский шум), принимаемое информационное сообщение искажается. Это изменяет исходные биты сообщения и может стать серьезной проблемой для точности и производительности цифровой системы. Поэтому методы обнаружения и исправления ошибок играют важную роль. Одним из способов преодоления ошибок при передаче является максимизация отношения сигнал/шум. Но на практике это отношение не может быть увеличено сверх возможного.

**Кодирование Рида Соломона.** Коды Рида-Соломона являются кодами исправления ошибок, которые используются в различных областях: от сбора данных из штрих-кодов и QR-кодов, которые мы используем в повседневной жизни, до отправки сообщений на космические аппараты. Ирвинг Рид и Гас Соломон открыли код Рида-Соломона (RS – Reed-Solomon) в 1959 [4]. С тех пор коды RS значительно способствовали усовершенствованию телекоммуникационных систем. Коды Рида-Соломона являются наиболее используемыми цифровыми кодами контроля ошибок для цифровой техники, такой как цифровой аудиодиск, системы дальней космической связи, системы с расширенным спектром, компьютерная память и контроль ошибок систем с обратной связью. Коды Рида-Соломона относятся к блочным линейным подмножествам [5, 6]. Код Рида-Соломона представляет собой матрицу RS ( $n, k$ ) с символами размерностью  $s$ -бита каждый. Кодер создает  $n$ -символьное кодовое слово, собирая  $k$  символов данных по  $s$  бит каждый, а затем добавляя символы четности. Каждый  $s$  бит содержит  $n \cdot k$  символов четности. Декодер Рида-Соломона может исправить пакеты данных длительностью до  $t$  символов в кодовом слове, где  $2t = n \cdot k$ . Код Рида-Соломона имеет максимальную длину кодового слова ( $n$ ) при заданном размере символа  $s$ , которая равна  $n = 2s - 1$ . Например, код с 8-битными символами ( $s = 8$ ) может иметь максимальную длину 255 байт. Можно сократить коды Рида-Соломона, сделав в кодере ряд символов сообщения нулевыми, не передавая их, а затем повторно вставив их в декодер. Число символов четности в кодовых словах коррелирует с количеством вычислительной мощности, необходимой для декодирования и кодирования кодов Рида-Соломона. Несмотря на то, что можно исправить значительное количество ошибок, большое значение длительности сообщения  $t$  требует большего количества вычислительной мощности, чем малое значение  $t$  [7].

**Модель трехмерного канала 3GPP 3D.** Модель трехмерного канала 3GPP используется для описания беспроводных каналов связи городов с плотной застройкой. Эта трехмерная геометрическая стохастическая модель описывает азимутальные и вертикальные (по углу места) направления рассеивающей среды между сектором мобильной пользовательской станцией (MS – mobile station) и стационарной базовой станцией (BS – base station) [8, 9]. Рассеивание представлено как статистическая характеристика с неопределенным местоположением. Модель характеризуется учетом путей распространения сигнала по прямой видимости (LoS – Line of Sight) и отсутствием прямой видимости (NLoS – No Line of Sight) [2, 10, 12]. Модель учитывает параметры для крупномасштабного замирания, мелкомасштабного замирания и средней потери маршрута распространения для каждого из этих случаев. Высота расположения базовой станции на конструкционной мачте и расстояние до точки разрыва в передаче сообщения влияют на вероятность нахождения в зоне прямой видимости. Место, где зона Френеля впервые нарушается между приемником и передатчиком, называется точкой разрыва [13, 14]. Место установки базовой станции имеет настройки, установленные в соответствии с местоположением и локальными условиями распространения. Параметры трехмерной модели распространения включают в себя: разброс задержки (дальности), разброс азимутального угла отправления и прибытия, разброс угла места отправления и прибытия, затухание тени и коэффициент Райса (только в сценарии LoS) [15]. Дополнительные параметры включают в себя мощности передатчиков, задержки, углы прибытия и отправления в направлениях угла места и азимута соответственно [13, 16–18]. В модели канала рассматриваются  $N$  передатчиков, каждый передающий сигнал может быть разбит на  $M$  путей передачи, в зависимости от отражающих объектов. На рис. 1 показана модель системы распространения в плоскости XYZ (азимут – угол места – задержка).

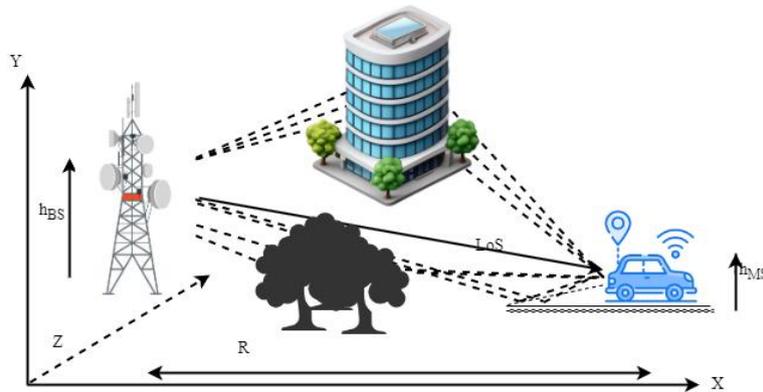


Рис. 1. Модель системы распространения в плоскости XZ

На рис. 1 расположение передающей BS (базовой станции) и приемной MS (мобильной станции) задается значениями высот  $h_{BS}$ ,  $h_{MS}$  и горизонтальным расстоянием  $R$ . Показаны пути распространения в условиях прямой видимости LoS и для условий с переотражениями вне прямой видимости NLoS (на рисунке показаны штриховыми трассами).

**Пространственно-временное кодирование.** Пространственно-временное кодирование (STC – Spatio-temporal coding) является эффективным методом оценки пропускной способности беспроводного канала MIMO [19]. Этот метод кодирования был разработан для работы с несколькими передающими антеннами. Кодирование выполняется в пространственных и временных областях для создания корреляции между сигналами, передаваемыми различными антеннами в разное время. Не уменьшая полосу пропускания, пространственно-временное кодирование может повысить мощность передачи по сравнению с пространственно некодированными системами. Передатчик использует несколько антенн для пространственно-временного кодирования. Символы можно кодировать во времени и пространстве [19–22]. Передатчик использует несколько антенн для пространственного кодирования. Параметры  $N_{RX}$  и  $N_{TX}$  обозначают соответственно количество приемных и передающих антенн. Параметр  $Q$  определяет количество периодов, которые охватывает пространственно-временный код. Матрица  $C[Q \times N_{TX}]$  используется для описания пространственно-временного кода. Каждый элемент матрицы  $C_k^i$  содержит комплексный символ основной полосы частот. Антенна посылает один сигнал или линейную комбинацию символов матрицы в течение  $k$ -го периода элемента  $i$ .

$$C = \begin{bmatrix} c_1^1 & c_2^1 & \dots & c_{N_{TX}}^1 \\ c_1^2 & c_2^2 & \dots & c_{N_{TX}}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1^Q & c_2^Q & \dots & c_{N_{TX}}^Q \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Большинство систем пространственно-временного кодирования допускают использование нескольких приемных антенн. Дополнительные приемные антенны обеспечивают как вещательное, так и приемное разнесение за счет пространственно-временного кодирования [13, 22]. Однако преимущество приемного разнесения требует большего оборудования, поскольку приемнику требуется больше цепей обработки.

**Результаты моделирования.** Компьютерное моделирование было использовано для оценки эффективности предложенного метода для систем SIMO-OFDM и MIMO-OFDM и для радиоканалов с несколькими лучами. В этом разделе представлены результаты исследования производительности передачи данных WiMAX с использованием 3D-модели канала 3GPP. Принимающая и передающая антенны были настроены на текущую частоту 2,5 ГГц, чтобы обеспечить умеренное затухание сигнала для требуемого беспроводного диапазона системы WiMAX. Выбор высоты и расстояния базовой и

мобильной станций основывается на ожидаемой производительности системы связи на высоте 25 метров и расстоянии между станциями около 2 километров в городской среде с плотной застройкой. Предполагается, что базовая станция BS остается на месте, а мобильная станция MS движется с постоянной скоростью 40 км/ч. В этом исследовании будут моделироваться все узлы системы SIMO и MIMO. Моделирование можно использовать для оценки производительности отдельных узлов системы в соответствии с параметрами.

Рис. 2 и 3 показывают вероятность ошибки системы SIMO-OFDM. На рис. 2 показаны графики для случаев с адаптацией и без нее, а на рис. 3 показаны графики для случаев с кодированием и адаптацией. Методом кодирования передаваемого сообщения являются коды Рида-Соломона.

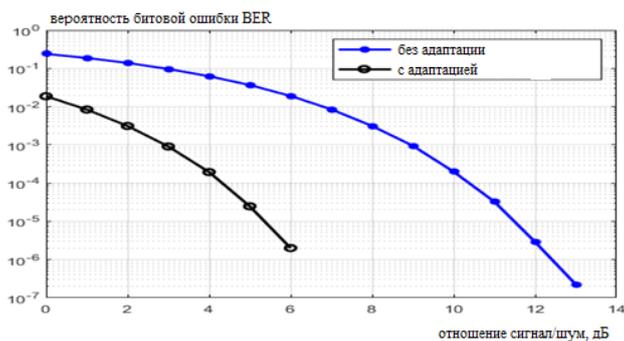


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки для адаптивного алгоритма в системе SIMO-OFDM от отношения сигнал/шум

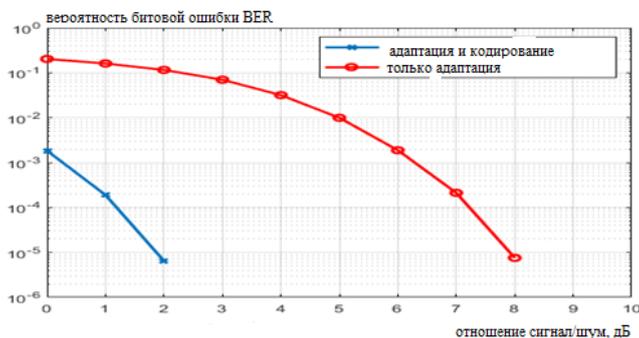


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки для адаптивного алгоритма в системе SIMO-OFDM и кодов Рида-Соломона от отношения сигнал/шум

Анализируя графики на рис. 2, можно заметить, что при фиксированном значении битовой ошибки, например в  $2 \cdot 10^{-6}$ , передача сообщения для алгоритма с адаптацией возможна при отношении сигнал/шум в 6 дБ, для случая без применения данного алгоритма достичь такого показателя битовой ошибки возможно только при отношении сигнал/шум в 12 дБ.

Анализируя графики на рис. 3, можно заметить, что при фиксированном значении битовой ошибки, например в  $8 \cdot 10^{-6}$ , передача сообщения для алгоритма с адаптацией и кодом Рида-Соломона возможна при отношении сигнал/шум в 2 дБ, для случая без применения кодирования достичь такого показателя битовой ошибки возможно только при отношении сигнал/шум в 8 дБ.

Приведенные выше результаты показывают, что алгоритм адаптации может обеспечить помехоустойчивость до 6 дБ. Кодирование каналов может адаптивно использоваться передатчиком и приемником при изменении помеховой среды во время передачи данных по беспроводному каналу и так же улучшает помехоустойчивость передачи сообщения.

На рис. 4 показаны графики для сценария без адаптации и случая с адаптацией для системы MIMO 3x3 и частотным мультиплексированием OFDM. Для системы MIMO результаты получены при числе антенн в передатчике и приемнике, равном 3.

Анализируя графики на рис. 4, можно заметить, что при фиксированном значении битовой ошибки, например в  $6 \cdot 10^{-6}$ , передача сообщения для алгоритма с адаптацией возможна при отношении сигнал/шум в 24 дБ, для случая без применения данного алгоритма достичь такого показателя битовой ошибки возможно только при отношении сигнал/шум в 29 дБ.

На рис. 5 показаны графики для совместного использования системы MIMO 3x3 – OFDM и кодирования Рида-Соломона.

Анализируя графики на рис. 5, можно заметить, что при фиксированном значении битовой ошибки, например в  $1 \cdot 10^{-5}$ , передача сообщения для алгоритма с адаптацией и кодом Рида-Соломона возможна при отношении сигнал/шум в 20 дБ, для случая без применения кодирования достичь такого показателя битовой ошибки возможно только при отношении сигнал/шум в 25 дБ.

Таким образом, использование адаптивного метода и кодирования может привести к увеличению помехоустойчивости системы до 5 дБ.

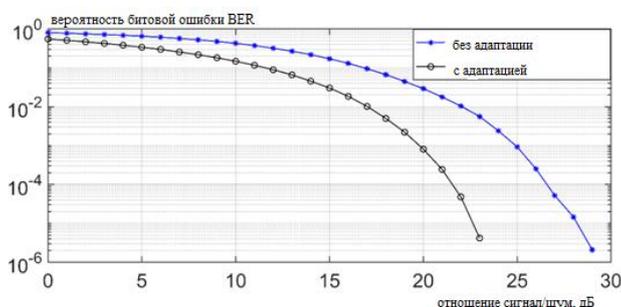


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки для адаптивного алгоритма в системе MIMO-OFDM от отношения сигнал/шум

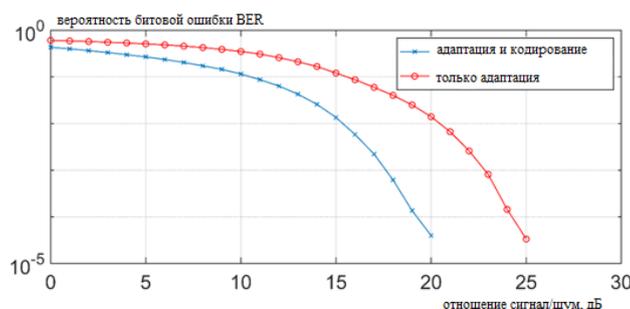


Рис. 5. Зависимость вероятности битовой ошибки для адаптивного алгоритма в системе MIMO-OFDM и кодов Рида-Соломона от отношения сигнал/шум

Применение алгоритма адаптации снижает вероятность битовой ошибки в передаваемом сообщении в системах SIMO и MIMO, как показано на рисунках 2 и 4. Можно сделать вывод, что использование адаптивных алгоритмов повышает помехоустойчивость при обработке сигналов в приемном устройстве в условиях многопутного распространения сигнала.

**Заключение.** Данное исследование посвящено исследованию совместного использования кодов Рида-Соломона и адаптивной системы обработки сигналов для 3D-системы, основанной на SIMO-OFDM и MIMO-OFDM. Результаты получены с использованием и без использования метода адаптации при различных уровнях отношения

сигнал/шум (SNR). Также учитываются проблемы повышения помехоустойчивости системы связи посредством использования алгоритмов адаптации в сочетании с помехоустойчивым кодированием. Использование кодирования совместно с алгоритмом адаптации делает поток информации более устойчивым к ухудшению качества передаваемой информации, вызванному шумом, помехами и затуханием сигнала. Эффективный механизм исправления ошибок включен в код Рида-Соломона. При использовании адаптивных алгоритмов для SIMO-OFDM и MIMO-OFDM код Рида-Соломона обеспечивает увеличение помехоустойчивости передачи до 6 дБ и до 5 дБ соответственно.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
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. Hendrick R.E. Signal, noise, signal-to-noise, and contrast-to-noise ratios // Breast MRI: fundamentals and technical aspects, Colorado. – 2008. – P. 93-111.
4. Reed Irving S., Solomon G. Polynomial Codes over Certain Finite Fields // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia. – 8 (2). – P. 300-304.
5. Shrivastava P., Singh U.P. Error detection and correction using Reed Solomon codes // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2013. – Vol. 3. – P. 965-969.
6. Wicker S.B., Bhargava V.K. An introduction to Reed-Solomon codes // Reed-Solomon codes and their applications. – 1994. – P. 1-16.
7. 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.
8. Федосов В.П., Аль-Мусави Вусам 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Федосов В.П., Джамил Д.С., Кучерявенко С.В. Передача данных в канале 3D WIMAX на основе SISO-OFDM и MIMO-OFDM // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 6 (216). – С. 6-18.
14. 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.
15. 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.
16. 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.

17. 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.
18. 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.
19. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в МIMO-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8 (171). – С. 35-43.
20. 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.
21. 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.
22. Федосов В.П., Аль-Мусаби 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.
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. 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.
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. Hendrick R.E. Signal, noise, signal-to-noise, and contrast-to-noise ratios, *Breast MRI: fundamentals and technical aspects*, Colorado, 2008, pp. 93-111.
4. Reed Irving S., Solomon G. Polynomial Codes over Certain Finite Fields, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia*, 8 (2), pp. 300-304.
5. Shrivastava P., Singh U.P. Error detection and correction using Reed Solomon codes, *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2013, Vol. 3, pp. 965-969.
6. Wicker S.B., Bhargava V.K. An introduction to Reed-Solomon codes, *Reed-Solomon codes and their applications*, 1994, pp. 1-16.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Fedosov V.P., Dzhamil D.S., Kucheryavenko S.V. Peredacha dannykh v kanale 3D WIMAX na osnove SISO-OFDM i MIMO-OFDM [Data transmission in 3D WIMAX channel based on SISO-OFDM and MIMO-OFDM], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6 (216), pp. 6-18.
14. 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.
15. 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 [ravnitel'naya jeffektivnost' besprovodnogo dostupa na osnove prostranstvennoy adaptatsii na vyhodah antennoy reshetki pri ispol'zovanii MIMO-OFDM v releevskom kanale], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10 (197), pp. 045-049.
16. 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.
17. 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.
18. Fedosov V.P., Kovtun D.G., Legin A.A., Lomakina A.V. Issledovanie modeli OFDM-sigнала s malym urovnem 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Fedosov V.P., Al'-Musavi Visam Mokhammedtaki M. Dzavad, Kucheryavenko S.V. Prostranstvenno-vremenny adaptivnyy algoritm s ispol'zovaniem koda Khemminga na osnove modeli bes-provodnogo 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.
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@sfnedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра теоретических основ радиотехники; профессор.

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

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

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

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

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