

В.П. Федосов, Т.Т. Пацюк**АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ MIMO-OFDM В УСЛОВИЯХ АКТИВНЫХ ПОМЕХ**

Рассмотрен алгоритм обработки пространственно-временных сигналов на основе MIMO-OFDM-системы связи при наличии активных помех. Приведены теоретические выкладки, уникальные подходы, необходимые для повышения пропускной способности канала связи при нахождении в нём точечного источника активных помех. Задача является актуальной в условиях плотной городской застройки, а также неуклонно растущих потребностей в улучшении помехоустойчивости и качества связи без расширения полосы пропускания. Для обработки информации в MIMO-OFDM-системе без помех инженерами преимущественно используется критерий максимума отношения сигнал/шум, однако при наличии активных помех применяется винеровский критерий. Он обеспечивает минимум среднеквадратической погрешности воспроизведения пилот-сигнала в OFDM. В этом случае выбирается сигнальное собственное число, собственный вектор, производится весовая обработка, принимается сигнал, который затем проверяется по критерию минимума ошибки. Технология мультиплексирования с ортогональным частотным разделением подразумевает наличие пилот-поднесущих, известных на приёмной стороне по частоте и коду модуляции. В расшифрованном коде производится сравнение по СКО, обеспечивается пороговая обработка. При большой ошибке происходит отказ от этого собственного числа. Методом перебора на основе пилота ищется минимальная приемлемая ошибка. Собственный вектор найденного сигнала будет использоваться для весовой обработки. Представлены эксперименты по детектированию сигнала в канале связи с адаптацией и без адаптации с использованием винеровского критерия и наличия помехи при двух видах модуляции (QAM-4, BPSK). Результаты показывают, что адаптация позволяет достичь снижения BER (частоты ошибки битов) на всей линии кривой зависимости и для всех ОСШ. Разработанный алгоритм может быть использован для систем связи и управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) при наличии активных помех.

MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); антенная решетка (АР); базовая станция (БС); мобильная станция (МС); беспроводная связь; пропускная способность; активная помеха.

V.P. Fedosov, T.T. Patsyuk**ALGORITHM FOR PROCESSING SPACE-TIME SIGNALS BASED ON THE MIMO-OFDM SYSTEM UNDER ACTIVE INTERFERENCE**

An algorithm for processing space-time signals based on a MIMO-OFDM communication system in the presence of active interference is described. Theoretical calculations are given, the detection of approaches that often cause the bandwidth of the communication channel when leaving a point source of active interference. The task is relevant in the conditions of dense urban development, as well as the steadily growing need to improve noise immunity and communication quality without bandwidth coverage. To process information in a MIMO-OFDM system without interference, engineers mainly use the criterion of maximum signal-to-noise ratios, however, in the presence of active interference, the Wiener criteria. It measures the minimum RMS pilot measurement error in OFDM. In this case, a signal receipt of a monetary amount, an eigenvector is detected, weight processing is performed, a signal is received that occurs according to the minimum error criterion. An orthogonal frequency division multiplexing technology with pilot subcarriers is reduced at the receive frequency in frequency and modulation code. Thresholding was found in the decrypted code, produced by the RMS comparison. The arrival of big money comes from this own number. Pilot-based enumeration searches for the minimum acceptable error. The eigenvector of the found signal will be for weight processing. Experiments are carried out to detect a signal in a

communication channel with and without adaptation using the Wiener criterion and the presence of interference with two types of modulation (QAM-4, BPSK). The results show that the adaptation improves the BER (bit error rate) state along the entire line of the curve and for all SNRs. The developed algorithm can be used for communication and control systems of unmanned aerial vehicles in the presence of active interference.

MIMO (Multiple Input Multiple Output); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing); antenna array (AR); base station (BS); mobile station (MS); wireless connection; bandwidth; active interference.

Введение. Стремительное развитие технологий передачи информации началось в середине XX века, благодаря развитию микроэлектроники и высокоскоростных цифровых процессоров. Сейчас с совершенствованием средств обмена данными, появлением сетей связи третьего (3G), четвертого (4G/LTE) и пятого (5G) поколения запросы пользователей невероятно возросли. Оттого значительно ценится скорость передачи и объемы переданной информации. Потому сейчас большое развитие получили MIMO-OFDM (Multiple Input Multiple Output - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) системы связи. Они позволяют увеличивать пропускную способность без расширения полосы пропускания [1–3], эффективно использовать радиочастотный спектр, а также противостоять межсимвольным помехам и интерференциям между поднесущими.

Городская инфраструктура не позволяет нам рассчитывать на беспрепятственное распространение сигнала. Здания, автомобили, ЛЭП – всё это становится барьерами для прохождения сигнала от передатчика к приёмнику по прямому пути и источниками переотражений сигналов и помех. Важным фактором в плотной городской застройке являются и другие каналы связи, которые могут «влезть» в полосу канала из-за нелинейности передатчика другой станции. Также качественный прием информации могут намеренно нарушать источники активных помех [4, 5].

Постановка задачи. Целью является разработка и исследование эффективности алгоритма обработки пространственно-временных сигналов на основе системы MIMO-OFDM в условиях активных помех в канале с многочисленными переотражениями.

Исходные данные. Средой распространения сигнала выбрана воздушная среда в городских условиях (плотная застройка). В качестве источника помехи используется модель точечного в пространстве источника с шумовой (нормальной) помехой. Источник с неизвестными координатами находится в канале связи.

Метод решения. Использование технологии MIMO (рис. 1) позволяет увеличить пропускную способность за счет одновременной передачи нескольких потоков данных через различные элементы антенной решетки (АР). Сигналы, излучаемые каждым из элементов, занимают одну полосу частот. Несмотря на то, что распространяются они в одной среде, за счет пространственной обработки такие сигналы могут быть разделены приемником, который также использует АР.

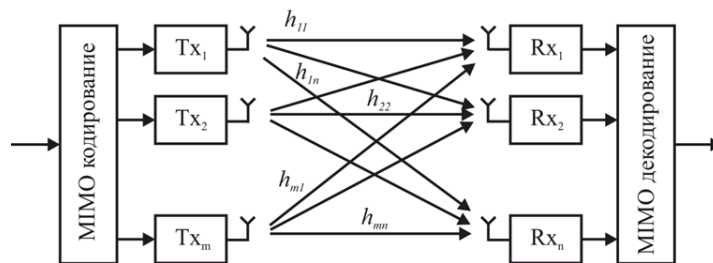


Рис. 1. Структурная схема MIMO-системы связи

Матрица коэффициентов передачи канала связи при этом выглядит следующим образом:

$$\mathbf{H}(t, \tau) = \begin{bmatrix} h_{11}(t, \tau) & h_{12}(t, \tau) & h_{13}(t, \tau) & \dots & h_{1N_t}(t, \tau) \\ h_{21}(t, \tau) & h_{22}(t, \tau) & h_{23}(t, \tau) & \dots & h_{2N_t}(t, \tau) \\ h_{31}(t, \tau) & h_{32}(t, \tau) & h_{33}(t, \tau) & \dots & h_{3N_t}(t, \tau) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ h_{N_r,1}(t, \tau) & h_{N_r,2}(t, \tau) & h_{N_r,3}(t, \tau) & \dots & h_{N_r,N_t}(t, \tau) \end{bmatrix}.$$

Технология OFDM представляет собой сочетание модуляции и мультиплексирования. Она повышает устойчивость канала связи против частотно-избирательных замираний, вызванных многопутным распространением сигналов. OFDM-сигнал состоит из множества ортогональных поднесущих, входящих в состав одного основного сигнала, а каждая поднесущая модулируется своим битовым потоком. При передаче информации ввиду наличия препятствий и помех отдельные поднесущие OFDM-сигнала могут быть искажены, а это может стать причиной потери информационных битов, входящих в состав передаваемого пакета. Тем не менее, применение технологии помехоустойчивого кодирования на передатчике позволяет в достаточной мере восстановить сигнал на приемной стороне.

Проанализируем упрощенную модель канала связи без помех [6]. В нем присутствует базовая станция (БС) и мобильная станция (МС). Обе станции включают приёмо-передающую аппаратуру как приёмниками, так и передатчиками. Чтобы обеспечить адаптацию MIMO на приеме [7, 8], разобьём антенную решётку приёмника МС на несколько блоков. На выходе AP приёмника строится пространственная корреляционная матрица. Затем находятся собственные числа, собственные вектора и строится соответствующая матрица. Отметим, что собственные числа здесь представляют собой мощности сигналов, пришедших на AP приёмника разными путями в совокупности с шумами приемной системы.

Проанализируем собственные числа с помощью критерия максимума отношения сигнал/шум (ОСШ). В алгоритм закладывается операция выбора максимального собственного числа (т.е. на раскрыв AP приходит максимальная мощность этого пути). Тогда выбирается соответствующий собственный вектор и коэффициенты столбца используются как весовой вектор. В этом случае получаем отдельную антенну из блока, у которой максимум характеристики направлен на конкретно выбранный путь, а на остальные пути формируются нулевые значения, и затем обеспечиваем такую обработку в каждом блоке.

Таким образом, приёмник адаптирован на один канал, однако эта же AP используется и для передачи [9–16]. По выбранному пути (чаще всего это будет прямой путь, если он есть) сигнал перенаправляется в обратную сторону, причем с максимальной мощностью. В приёмнике БС также обеспечивается адаптация, строится корреляционная матрица. Максимальное собственное число при этом будет одно, остальные подавляются (т.к. сигнал не излучается по другим направлениям). Собственный вектор, соответствующий собственному числу, используется уже для приёма MIMO-системы в БС. Иными словами, приемник БС аналогично разбивается на блоки, а затем они адаптируются на выбранный путь. Подобного рода адаптация является текущей, то есть она обеспечивается прямо в процессе приёма (приёмник в таком случае называется «информированным»).

Теперь рассмотрим работу алгоритма в условиях помех. Пусть имеется дезинформирующая активная помеха, которая создаётся точечным передатчиком, расположенным произвольно в канале связи. Поскольку канал распространения сигнала тот же самый, то число путей, приходящих на приёмник, увеличивается вдвое: сигнальные пути от БС и пути от помеховой станции (рис. 2).

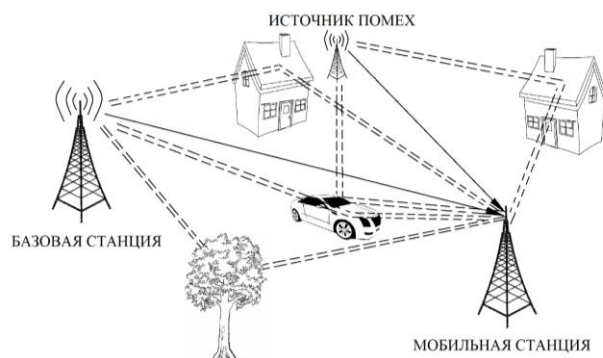


Рис. 2. Модель канала связи с источником активных помех

В предыдущем случае (без помехи) использовался критерий максимума ОСШ, однако здесь он не подходит: при выборе собственного числа возникает вопрос, каким оно является (помеховым или сигнальным). Потому будем использовать винеровский критерий, в котором обеспечивается минимум среднеквадратической погрешности воспроизведения пилот-сигнала в OFDM. В этом случае выбирается сигнальное собственное число, соответствующий ему собственный вектор, производится весовая обработка сигналов на выходах приёмной АР и сложение сигналов. Правильность выбора сигнального пути по критерию минимума среднеквадратической ошибки приёма сигналов пилот-поднесущих OFDM.

Технология OFDM подразумевает наличие пилот-поднесущих, известных на приёмной стороне по частоте и по коду модуляции [17, 18]. В расшифрованном коде выбираются позиции этих пилот-сигналов, производится сравнение по среднеквадратической ошибке, затем обеспечивается пороговая обработка. При большой ошибке происходит отказ от этого собственного числа. Так методом перебора ищется минимальная приемлемая ошибка, которая будет на основе пилот-поднесущей. Это будет означать, что выбран сигнальный путь с максимальной мощностью, а в направлении других сигнальных и помеховых путей в эквивалентной характеристике приёмной АР автоматически формируются нули [19].

На рисунках ниже представлены эксперименты по детектированию сигнала в канале связи с адаптацией и без адаптации с использованием винеровского критерия и наличия помехи, так как этот случай представляет особый интерес для практики. Моделирование произведено в среде Matlab [20].

Параметры канала связи:

Тип канал – Рэлеевский канал связи с многочисленными переотражениями;

Частота дискретизации – 500 кГц;

Максимальный Допплеровский сдвиг – 200 Гц.

Параметры системы связи:

Типы модуляции – QAM-4, BPSK;

Моделируемые ОСШ – 0÷20 дБ;

Отношение помеха/шум – 10 дБ;

Число приемных антенн – 4, 4, 6;
 Число передающих антенн – 1, 4, 4;
 Число символов модуляции – 1,5 x число приемных антенн;
 Число поднесущих – 24;
 Число сценариев для усреднения при оценке вероятности битовой ошибки – 10000.

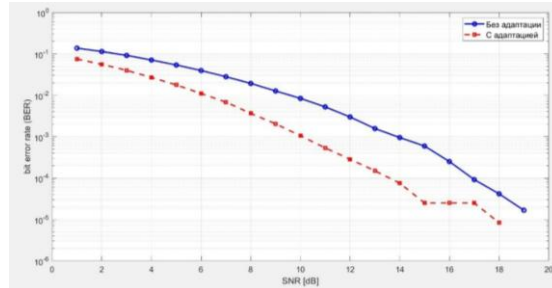


Рис. 3. Кривые BER 1x4 системы, QPSK модуляция

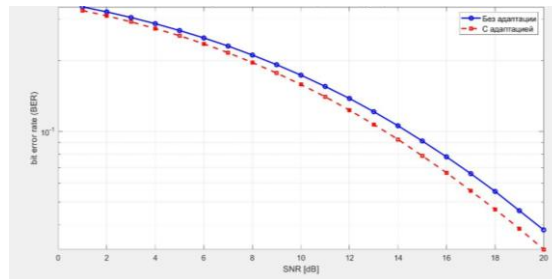


Рис. 4. Кривые BER 4x4-системы, QPSK модуляция

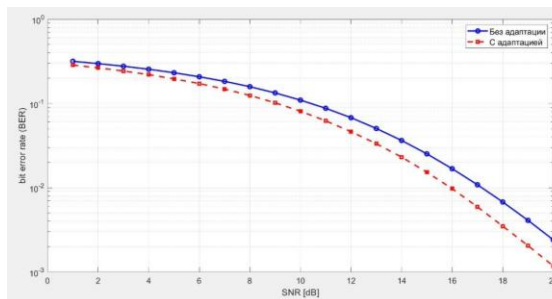


Рис. 5. Кривые BER 4x6-системы, QPSK модуляция

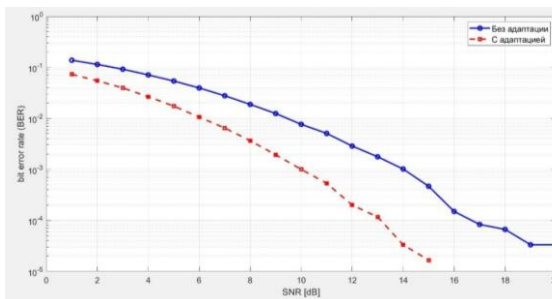


Рис. 6. Кривые BER 1x4-системы, BPSK модуляция

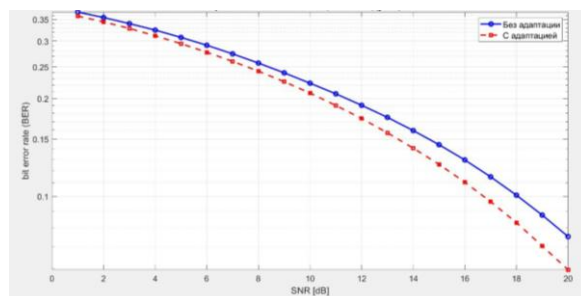


Рис. 7. Кривые BER 4x4-системы, BPSK модуляция

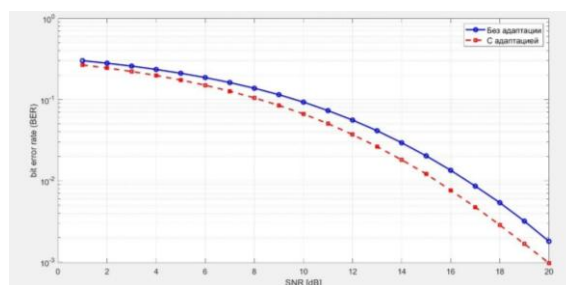


Рис. 8. Кривые BER 4x6-системы, BPSK модуляция

Видно, что применение адаптации даже в условиях наличия помехи на БС позволяет достичь снижения BER (частоты ошибки битов) на всей линии кривой зависимости и для всех ОСШ, что повышает помехоустойчивость приемника и является ценным для практических приложений ММО-OFDM-систем связи.

При этом очевидно, что адаптивная обработка улучшает качество детектирования сигнала вне зависимости от видов модуляций поднесущих, а также количества элементов приемных и передающих антенных решёток. Снижения вероятности битовой ошибки представлены в табл. 1 при отношении сигнал/шум 8 дБ для типов кодирования QPSK и BPSK при разном числе антенных элементов АР передатчика и приёмника: 1 x 4, 4 x 4 и 4 x 6.

Таблица 1

Результаты снижения вероятности битовой ошибки для различных параметров системы связи

№ п/п	Число антенн передатчика и приёмника	Тип модуляции сигнала	Отношение вероятностей битовой ошибки без адаптации и с адаптацией
1.	1 x 4	QPSK	7,7
2.	4 x 4	QPSK	1,2
3.	4 x 6	QPSK	1,3
4.	1 x 4	BPSK	16,3
5.	4 x 4	BPSK	1,1
6.	4 x 6	BPSK	1,4

Выводы. Разработанный алгоритм позволяет уменьшить вероятность битовой ошибки при наличии в канале точечного источника активных помех с отношением помеха/шум 10 дБ. Обеспечение адаптации элементов АР на приемной стороне даёт возможность выбора одного (в большинстве случаев прямого) пути, по

которому приходит максимальный сигнал, и подавления сигналов остальных путей. Таким образом, мощность передатчика тратится исключительно на путь, позволяющий обеспечить максимальную эффективность работы канала на приём. При отсутствии прямого пути система связи работает идентично путем выбора другого пути.

Использование винеровского критерия вместо критерия максимума ОСШ позволяет осуществлять качественную обработку сигнала даже тогда, когда на канал связи оказывают влияние помехи, как вызванные «внедрением» сигнала соседней станции (ввиду нелинейности передатчика этой станции), так и создание преднамеренной активной помехи. Благодаря пороговой обработке производится корректный выбор переданного БС сигнала, который пришел на раскрыв приемной АР.

Моделирование показывает снижение вероятности битовой ошибки на выходе приёмника при различных параметрах ММО-OFDM-системы связи.

На рисунках представлены результаты оценки вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум для алгоритма с адаптацией и без адаптации при различных числах элементов антенных решеток передатчика и приёмника, а также видов кодирования. эксперименты по детектированию сигнала в канале связи с адаптацией и без адаптации.

Разработанный алгоритм может быть использован для систем связи и управления беспилотными летательными аппаратами при наличии активных помех.

Разработка и исследование алгоритма выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №22-29-01389 от 21.12.2021 в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Сравнительная эффективность беспроводного доступа на основе пространственной адаптации на выходах антенной решётки при использовании ММО-OFDM в релейском канале связи // Антенны. – 2013. – № 10 (197). – С. 45-49.
3. 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.
4. 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.
5. Taiwen Tang; Heath R.W. Space-time interference cancellation in MIMO-OFDM systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2005. – P. 1802-1816.
6. 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.
7. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в ММО-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8. – С. 35-43.
8. 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.
9. Федосов В.П. Алгоритмы совместной адаптации на приём и передачу в системе связи на основе антенных решёток при наличии активных помех // Прикладная электродинамика и антенные измерения.
10. 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.

11. Федосов В.П., Романов В.А. Статистическая радиотехника: электронное учебное пособие. – Ростов-на-Дону, 2008.
12. 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.
13. 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.
14. Fedosov V., Legin A., and Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO—OFDM technique // 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2017. – P. 218-221.
15. 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.
16. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Modeling of systems wireless data transmission based in antenna arrays in underwater acoustic channels в сборнике: Proceedings of SPIE // The International Society for Optical Engineering. Architectures, Algorithms, and Applications. Ser. "Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications 2016". – 2016. – P. 98720G.
17. Minn H., Al-Dhahir N. Optimal training signals for MIMO OFDM channel estimation // *IEEE transactions on wireless communications*. – 2006. – Vol. 5, No. 5. – P. 1158-1168.
18. Raleigh G.G., Cioffi J.M. Spatio-temporal coding for wireless communication // *IEEE Transactions on communications*. – 1998. – Vol. 46, No. 3. – P. 357-366.
19. Федосов В.П., Емельяненко А.В. Устойчивость к ошибкам в оценке весовых векторов адаптивного пространственно-временного алгоритма радиосвязи на антенных решётках в релейском канале // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 11 (148). – С. 37-44.
20. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. – John Wiley & Sons, 2010.

REFERENCES

1. Fedosov V.P., Kucheryavenko S.V., Muravitskiy N.S. Povyshenie effektivnosti radiosvyazi v releevskom kanale na osnove antennykh reshetok [Improving the efficiency of radio communication in the relay channel based on antenna arrays], *Antenny* [Antennas], 2008, No. 11, pp. 98-104.
2. 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 the antenna array outputs when using MIMO-OFDM in a relay communication channel], *Antenny* [Antennas], 2013, No. 10 (197), pp. 45-49.
3. 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.
4. Muravitskiy N.S., Fedosov V.P. Metod uluchsheniya priema v sisteme besprovodnoy peredachi dannykh na osnove antennykh reshetok pri nalichii aktivnykh pomekh [A method for 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.
5. Taiwan Tang; Heath R.W. Space-time interference cancellation in MIMO-OFDM systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, pp. 1802-1816.
6. 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.

7. 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-system of wireless data transmission], *Antenny* [Antennas], 2011, No. 8, pp. 35-43.
8. 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.
9. Fedosov V.P. Algoritmy sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennykh reshetok pri nalichii aktivnykh pomekh [Algorithms of joint adaptation to reception and transmission in a communication system based on antenna arrays in the presence of active interference], *Prikladnaya elektrodinamika i antennoye izmereniya* [Applied electro-dynamics and antenna measurements].
10. Fedosov V.P., Ternovoy D.O. Algoritm sovmestnoy adaptatsii na priem i peredachu v sisteme svyazi na osnove antennykh 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.
11. Fedosov V.P., Romanov V.A. Statisticheskaya radiotekhnika: elektronnoe uchebnoe posobie [Statistical radio engineering: an electronic textbook]. Rostov-on-Don, 2008.
12. 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.
13. 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, pp. 443-446.
14. Fedosov V., Legin A., and Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO—OFDM technique, *2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2017, pp. 218-221.
15. 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.
16. Fedosov V.P., Lomakina A.V., Legin A.A., Voronin V.V. Modeling of systems wireless data transmission based in antenna arrays in underwater acoustic channels в сборнике: Proceedings of SPIE, *The International Society for Optical Engineering. Architectures, Algorithms, and Applications. Ser. "Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications 2016"*, 2016, pp. 98720G.
17. Minn H., Al-Dhahir N. Optimal training signals for MIMO OFDM channel estimation, *IEEE transactions on wireless communications*, 2006, Vol. 5, No. 5, pp. 1158-1168.
18. Raleigh G.G., Cioffi J.M. Spatio-temporal coding for wireless communication, *IEEE Transactions on communications*, 1998, Vol. 46, No. 3, pp. 357-366.
19. Fedosov V.P., Emel'yanenko A.V. Ustoychivost' k oshibkam v otsenke vesovykh vektorov adaptivnogo prostranstvenno-vremennogo algoritma radiosvyazi na antennykh reshetkakh v releevskom kanale [Resistance to errors in the estimation of weight vectors of the adaptive space-time algorithm of radio communication on antenna arrays in the Rayleigh channel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 37-44.
20. Cho Y.S., Kim J., Yang W.Y., Kang C.G. MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB. John Wiley & Sons, 2010.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

Федосов Валентин Петрович – Южный федеральный университет; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Пацюк Тимур Тимофеевич – e-mail: patzyuck2011@yandex.ru; тел.: +79185120831; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Fedosov Valentin Petrovich – Southern Federal University; e-mail: vpfedosov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor,

Patsyuk Timur Timofeevich – e-mail: patzyuck2011@yandex.ru; phone: +79185120831; the department of fundamentals of radio engineering; graduate student.