

DOI 10.24412/2221-2574-2025-2-14-20

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРЁХМЕРНОЙ МОДЕЛИ РАССЕИВАТЕЛЕЙ В МІМО СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Паршин Александр Юрьевич

кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

E-mail: parshin.a.y@rsreu.ru

Нгуен Ван Хань

аспирант ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

E-mail: khanhkhanhkpr@gmail.com

Адрес: 390005, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Аннотация: В статье выполняется оценка эффективности относительного пространственно-временного кодирования для систем МІМО с различным количеством антенн в условиях многолучевого распространения. Используется разработанная трёхмерная геометрическая модель для моделирования размещения рассеивателей в канале связи. Влияние рассеивателей заключается в значительном изменении фазы сигналов при распространении. Рассеянные сигналы также отличаются по мощности от прямых сигналов. Приводятся результаты анализа вероятности ошибки на бит в системе связи МІМО при относительном пространственно-временном кодировании с использованием фазовой модуляции в зависимости от отношения сигнал-шум в приёмных антеннах. Полученные результаты позволяют оценить влияние рассеивателей на вероятность битовой ошибки при демодуляции с учётом используемой трёхмерной геометрической модели, а также при различных конфигурациях приёмной антенной системы.

Ключевые слова: МІМО, геометрическая трёхмерная модель рассеяния, каналные коэффициенты, относительные коды, помехоустойчивость, фазовая модуляция, COST-259.

Введение

Системы связи с применением технологии МІМО являются важной частью беспроводной связи и в настоящее время являются актуальным направлением развития беспроводных технологий. Технология МІМО обладает рядом перспективных свойств, в том числе — повышение энергоэффективности приёма сигналов, возможность использования пространственного мультиплексирования, уменьшение влияния помех и увеличение пропускной способности по сравнению с системами с одним входом и одним выходом (SISO) [1]. Однако, растущие требования к скорости передачи данных в современных системах беспроводной связи приводят к исследованию новых методов кодирования, которые обеспечивают более эффективную передачу данных при обеспечении связи в сложных условиях многолучевого распространения. Относительное пространственно-временное кодирование применяется при обеспечении связи

в условиях быстрого устаревания оценок матрицы каналных коэффициентов и позволяет улучшить качество связи в беспроводных системах. В работах [2, 3] предложены схемы относительного кодирования для системы с двумя передающими антеннами. При декодировании не требуется оценка матрицы каналных коэффициентов на приёмнике, восстановление отсчётов выполняется относительно предыдущего принятого отсчёта. В работе [4] метод дифференциального (относительного) пространственно-временного кодирования разработан для систем МІМО с различным количеством передающих и приёмных антенн. В вышеперечисленных работах использованы фазовые модуляции типа BPSK, QPSK, 8-PSK, а каналные коэффициенты являются комплексными гауссовскими случайными величинами. Однако, при проектировании современных радиотехнических систем важно учитывать внешние воздействия, так как они значительно влияют на надёжность и функциональ-

ность этих систем [5]. В реальных условиях наблюдается наличие рассеивателей, таких как здания, деревья и другие объекты, которые влияют на распространение радиосигналов [6]. Поэтому возникает потребность в анализе влияния рассеивателей на эффективность методов кодирования систем ММО.

В работе рассматривается эффективность относительного пространственно-временного блочного кодирования для систем ММО в условиях наличия рассеивателей в канале связи. Появление рассеивателей приводит к изменению канальных коэффициентов и, как следствие, фазы и амплитуды радиосигналов. Для моделирования размещения рассеивателей в среде используется геометрическая трёхмерная модель ММО канала связи с гауссовским распределением рассеивателей на поверхности сферы. Для оценки эффективности относительного кодирования проводится анализ зависимости вероятности битовой ошибки системы связи от отношения сигнал-шум и коэффициента Райса при различном числе антенн.

Относительное пространственно-временное блочное кодирование

Алгоритм относительного пространственно-временного кодирования основан на наличии в принятых отсчётах сигнала информации о канальных коэффициентах. Принятые отсчёты можно представить в виде произведения передаваемого сигнала и канального коэффициента для определенной пары приёмной и передающей антенн. Тогда можно выполнять восстановление переданных данных без оценки значений канальных коэффициентов [7]. Эффективным является применение данного алгоритма для высокоскоростных беспроводных систем, так как оценка канальных коэффициентов и адаптация алгоритма кодирования под оценённые значения требует времени. Относительное кодирование выполняется в соответствии с матрицами Аламоути пространственно-временных блочных кодов [8].

Рассмотрим ММО систему связи с $N_{TX} = 2$ передающими антеннами и N_{RX} приёмными антеннами. Каждый набор из b бит двоичных данных соответствует одному из 2^b PSK-символов, образующих созвездие. Битовый блок используется для выбора вектора коэффициентов (R_1, R_2) . Относительный пространственно-временной блочный код основан на том, что комплексные векторы (x_{2t-1}, x_{2t}) и $(-x_{2t}^*, x_{2t-1}^*)$ ортогональны друг другу. В результате следующие два символа для передачи в моменты времени $2t+1$ и $2t+2$ представляются следующим образом:

$$(x_{2t+1}, x_{2t+2}) = R_1(x_{2t-1}, x_{2t}) + R_2(-x_{2t}^*, x_{2t-1}^*), \quad (1)$$

где относительные коэффициенты R_1 и R_2 выбираются таким образом, чтобы все передаваемые сигналы (x_{2t-1}, x_{2t}) и (x_{2t+1}, x_{2t+2}) представляли созвездие. Для QPSK модуляции определяются два набора относительных коэффициентов V_1, V_2 , соответствующих группам модулированных сигналов A_1, A_2 : $(R_1, R_2) \in V_1$ если $(x_{2t-1}, x_{2t}) \in A_1$ и т. д. Значения относительных коэффициентов приведены в работе [9]. Комплексная матрица, составленная из модулированных символов, должна удовлетворять условию ортогональности. Указанным условиям удовлетворяет матрица Аламоути

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{2t-1} & -x_{2t}^* \\ x_{2t} & x_{2t-1}^* \end{bmatrix}.$$

Для QPSK произвольно определяются два различных символа x_1 и x_2 так, что x_1 и x_2 могут принимать любые значения сигнального созвездия x_k [10]:

$$x_k = \frac{1}{\sqrt{N_{TX}}} \exp\left(\frac{\pi k j}{2}\right), \quad \text{при } k = 0, 1, 2, 3.$$

На приёмной стороне на каждую из приёмных антенн поступает комбинация сигналов, излучаемых всеми передающими антеннами. Тогда принимаемый сигнал можно описать уравнением:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{N},$$

где $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{N_{RX}1} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{1N_{TX}} & \dots & h_{N_{RX}N_{TX}} \end{bmatrix}$ — канальная матрица, которая содержит коэффициенты передачи сигналов. Эти коэффициенты учитывают особенности среды передачи и могут меняться в зависимости от расстояния и наличия рассеивателей, что, в свою очередь, влияет на качество принимаемого сигнала. Рассматривая сигнал в одной приёмной антенне, можно записать следующие выражения для последовательных моментов времени $2t-1, 2t, 2t+1$ и $2t+2$ [8]:

$$\begin{aligned} y_{2t-1} &= h_1 x_{2t-1} + h_2 x_{2t} + n_{2t-1}; \\ y_{2t} &= -h_1 x_{2t}^* + h_2 x_{2t-1}^* + n_{2t}; \\ y_{2t+1} &= h_1 x_{2t+1} + h_2 x_{2t+2} + n_{2t+1}; \\ y_{2t+2} &= -h_1 x_{2t+2}^* + h_2 x_{2t+1}^* + n_{2t+2}. \end{aligned}$$

Таким образом, восстановленные значения относительных коэффициентов могут быть представлены следующим выражением [5]:

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_1 \\ \hat{R}_2 \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} y_{2t-1}^* & y_{2t} \\ y_{2t}^* & -y_{2t-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{2t+1} \\ y_{2t+2} \end{bmatrix}}{|y_{2t-1}|^2 + |y_{2t+1}|^2}.$$

При использовании многоантенных приёмных устройств применяется аналогичное выражение с учётом матрицы канальных коэффициентов для большего числа антенн. Для восстановления переданных информационных бит используется алгоритм оценки максимального правдоподобия. Эффективность системы затем оценивается по вероятности битовой ошибки.

Результаты моделирования

Для оценки влияния расположения рассеивателей на характеристики канала связи выполнено компьютерное моделирование относительного пространственно-временного кодирования системы ММО. Передаваемая последовательность составляет 1000 бит. Пусть базовая станция включает две передающие антенны $N_{TX} = 2$, а количество приёмных антенн у

абонента, соответственно, равно $N_{RX} = 1; 2; 4$.

Расстояние между антенными элементами при моделировании равно $d = \lambda / 2$, где λ — длина волны. Предполагается, что между базовой станцией и абонентом находится кластер из $N = 100$ рассеивателей, которые располагаются на поверхности сферы радиусом $R = 200\lambda$. В трёхмерной системе координат положение рассеивателей задаётся по азимуту γ в соответствии с равномерной плотностью распределения вероятностей и углу места β в соответствии с гауссовской плотностью распределения вероятностей, которые описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} f(\gamma) &= \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \gamma \leq 2\pi, \\ f(\beta) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\beta^2}{2\sigma_\beta^2}} \operatorname{erf}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}\sigma_\beta}\right), \quad -\pi \leq \beta \leq \pi, \end{aligned}$$

где σ_β — среднеквадратическое отклонение угломестного направления на рассеиватель. В данной работе для моделирования выбрано значение $\sigma_\beta = 0,2$ рад. Расстояние между передатчиком и приёмником равно $D = 3000\lambda$. Положение сферы рассеивателей соответствует сценарию С стандарта COST-259 (рис. 1), который характеризует городскую среду, где рассеивателями являются постройки и здания, а направление прихода рассеянного сигнала значительно отличается от прямого луча [12]. Радиосигналы распространяются от передатчиков с однократным рассеянием на объектах. В случае отсутствия прямой видимости канальный коэффициент передачи h_{TX_l, RX_k} для каждой пары приёмных и передающих антенн может быть вычислен согласно уравнению [13]:

$$\begin{aligned} h_{TX_k, RX_l} &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N L_{n,k,l} a_{n,k} b_{n,l} e^{j\phi_{n,k,l}}, \\ k &= 1, \dots, N_{TX}, \quad l = 1, \dots, N_{RX}, \end{aligned}$$

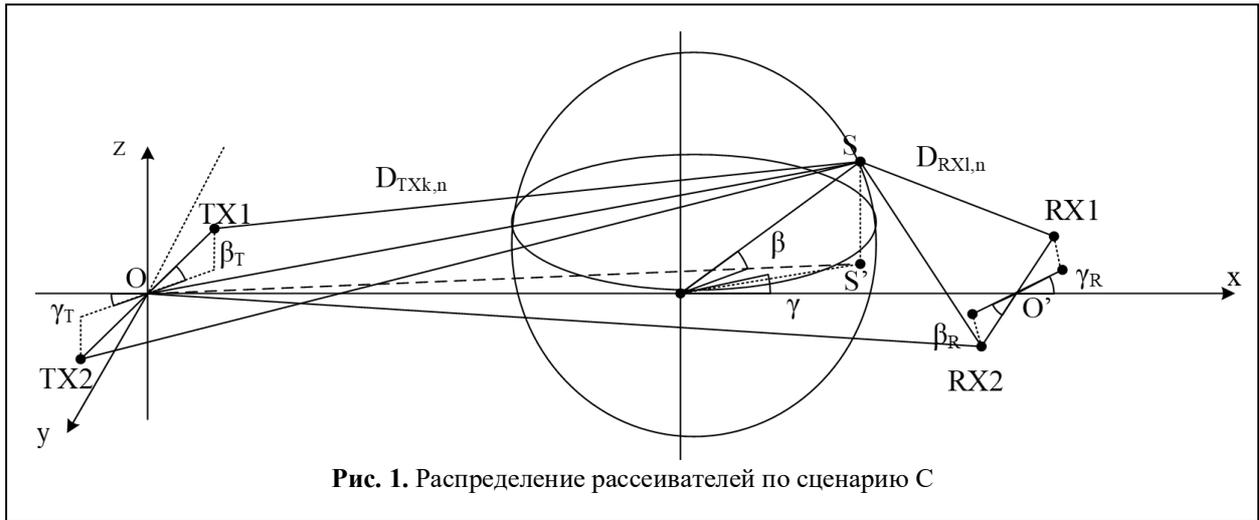


Рис. 1. Распределение рассеивателей по сценарию С

где $a_{n,k} = e^{\frac{j2\pi D_{TXk,n}}{\lambda}}$ — коэффициент, определяющий изменение фазы сигнала на участке от k -й передающей антенны до n -го рассеивателя, N — число рассеивателей;

$b_{n,l} = e^{\frac{j2\pi D_{RXl,n}}{\lambda}}$ — коэффициент, определяющий изменение фазы сигнала на участке от n -го рассеивателя до l -й приёмной антенны;

$L_n = \frac{\lambda}{4\pi(D_{TXk,n} + D_{RXl,n})}$ — затухание радиосиг-

нала при распространении от передатчика до приёмника и рассеянии; φ_n — случайное искажение фазы при рассеянии на рассеивающем объекте; $D_{TXk,n}$ и $D_{RXl,n}$ представляют собой расстояния между передающими антеннами и рассеивателями, а также между рассеивателями и приёмными антеннами. При распространении сигнала без рассеяния канальный коэффициент передачи h_{TX_i,RX_k} для каждой пары приёмных и передающих антенн может быть вычислен согласно уравнению [13]:

$$h_{TX_k,RX_l} = L_{LOSk,l} e^{j\phi_{k,l}},$$

$$k = 1, \dots, N_{TX}, l = 1, \dots, N_{RX},$$

где $L_{LOSk,l} = \frac{\lambda}{4\pi D_{TX,RXk,l}}$ — затухание радиосигнала при распространении от передатчика до приёмника по прямому пути;

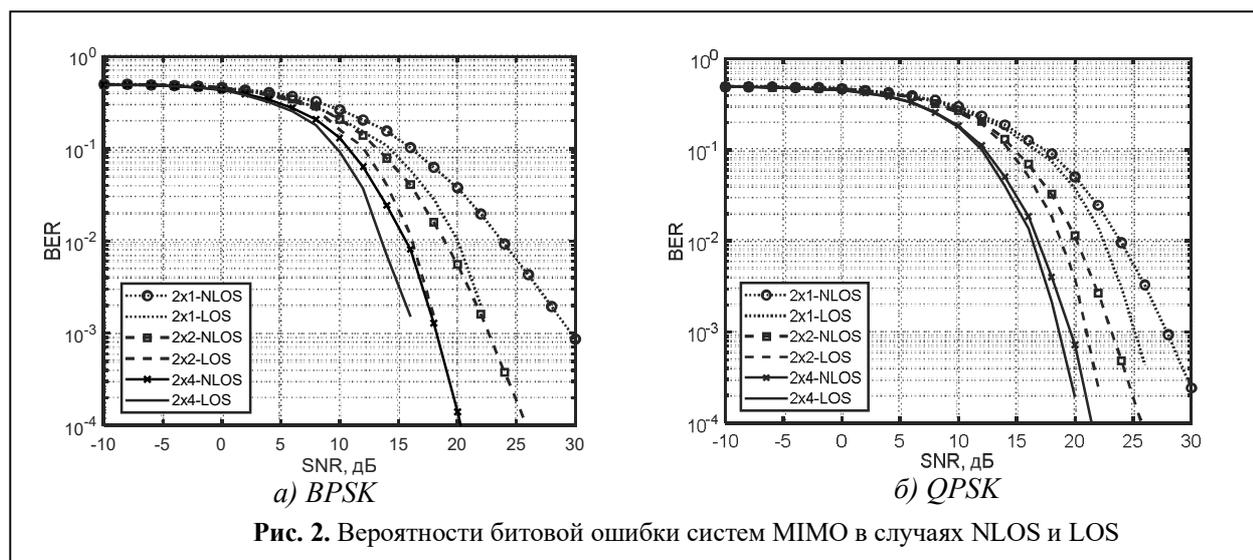
$D_{TX,RXk,l}$ — расстояние между элементами передающей и приёмной антенных систем.

Для сравнения эффективности канала связи в условиях многолучёвости при наличии рассеивателей проведён анализ вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал-шум на приёмной стороне. При наличии рассеивателей канальная матрица систем ММО учитывает прямой луч \mathbf{H}_{LOS} и рассеянный луч \mathbf{H}_{DIF} , и принимает вид:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_{DIF} + \sqrt{\frac{K}{K+1}} \mathbf{H}_{LOS},$$

где K — коэффициент Райса, который устанавливает соотношение между мощностью прямого луча и рассеянных лучей [14].

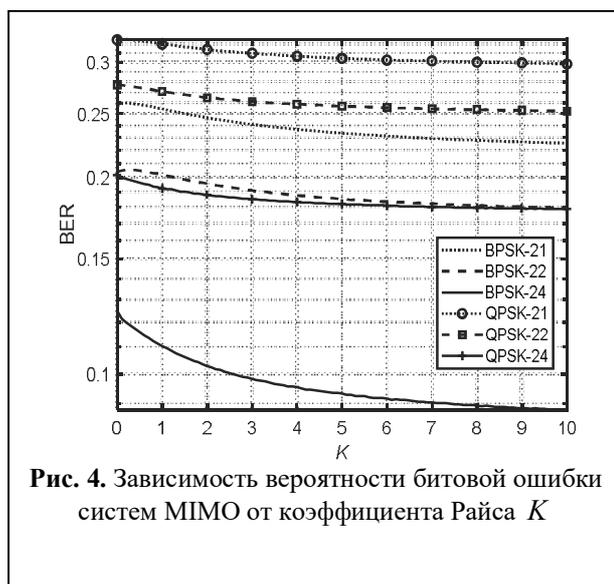
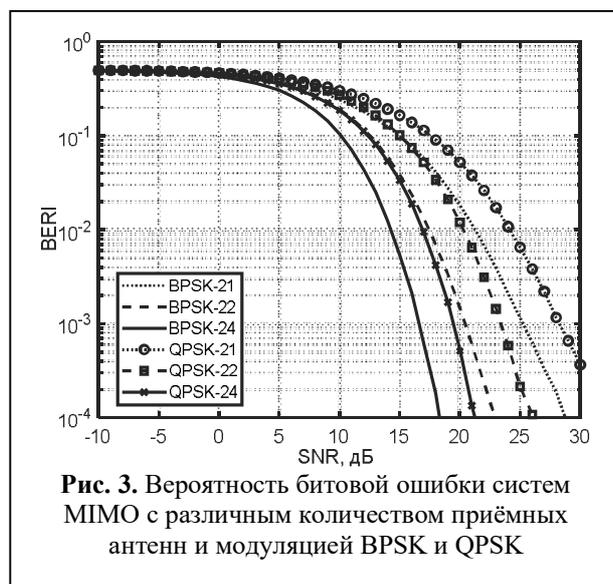
На рис. 2, а и рис. 2, б представлены результаты моделирования вероятности битовой ошибки канала связи для систем ММО в условиях распространения радиосигналов без прямого луча (NLOS) и только прямым лучом (LOS) при фазовой модуляции типа BPSK и QPSK. Наличие рассеивателей приводит к увеличению вероятности битовой ошибки при декодировании сигнала. При моделировании задаётся диапазон значений отношения сигнал-шум на символ, характеризующий суммарную мощность сигнала во всех антеннах передатчика с учётом канальных коэффициентов относительно шума на приёмной стороне $q = P_{RX}/P_n$. Для расчёта отношения сигнал-



шум уровень сигнала на входе приёмника нормируется к сигналу, распространяющемуся по прямому пути $P_{RX} = P_{TX} / L_{LOS}^2$. При значении $BER=10^{-2}$ и модуляции типа BPSK в случае NLOS наблюдается увеличение требуемого отношения сигнал-шум на приёмнике по сравнению со случаем LOS на 3,8 дБ; 2,6 дБ и 2,0 дБ для конфигураций передающих и приёмных антенн $N_{TX} = 2$ и $N_{RX} = 1; 2; 4$ соответственно. При использовании модуляции QPSK эти значения меньше и составляют 1,5 дБ; 1,4 дБ и 0,5 дБ для тех же конфигураций антенн.

На рис. 3 приведены вероятности битовой ошибки систем MIMO с различной

конфигурацией антенн при использовании модуляции типа BPSK и QPSK для распространения сигнала только при рассеянии со значением коэффициента Райса $K = 5$. На рис. 4 приведена зависимость вероятности битовой ошибки BER от коэффициента Райса K при значении отношение сигнал-шум в приёмных антеннах $q = 10$ дБ. Сравнивая результаты, приведённые в рисунках, можно отметить, что влияние рассеивателей более существенно для систем с меньшим количеством приёмных антенн и при использовании модуляции BPSK по сравнению с QPSK. Кроме того, наблюдается уменьшение вероятности битовой ошибки системы MIMO с использова-



нием относительного кодирования при увеличении коэффициента Райса K .

Заключение

Применение относительного пространственно-временного кодирования наиболее эффективно в условиях быстро меняющейся матрицы канальных коэффициентов. Полученные результаты демонстрируют повышение вероятности битовой ошибки при наличии рассеивателей и снижении мощности сигнала в канале связи при распространении по прямому пути относительно рассеянного сигнала. Применение трёхмерной геометрической модели расположения рассеивателей позволяет эффективно моделировать каналы связи в условиях наличия рассеивателей при различных сценариях их расположения, а также при неравномерном их распределении на сфере.

*Работа выполнена при поддержке
Российского научного фонда, грант РНФ
24-29-00850, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00850/> в Рязанском государственном
радиотехническом университете
имени В.Ф. Уткина*

Литература

1. Claude O., Bruno C. MIMO Wireless Communications From real-world propagation to space-time code design. *Technology & Engineering*, 2010. 480 p.
2. Hochwald B.M., Marzetta T.L. Unitary space-time modulation for multiple antenna communications in Rayleigh flat fading // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2000. Vol. 46. No. 2. Pp. 543–564.
3. Tarokh V., Jafarkhani H. A differential detection scheme for transmit diversity // *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18. No. 7. Pp. 1169–1174.
4. Паришин А.Ю., Нгуен В.Х. Анализ эффективности MIMO системы связи с относительным кодированием при наличии рассеивателей // *Вест-*

ник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 89. С. 3–11.

5. Токарь М.С., Рябов И.В. Метод дифференциального пространственно-временного блочного кодирования для применения в системах подвижной радиосвязи с использованием технологии MIMO // *Журнал Радиоэлектроники*. 2021. № 6.
6. Гаврилов В.М., Никитин О.Р., Смирнов Д.С. Исследование влияния радиопрозрачного обтекателя на характеристики многоэлементных радиотехнических систем // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2022. №1. С. 62–69.
7. Паришин А.Ю., Нгуен В.Х. Разработка модели и классификация MIMO каналов связи в трехмерной системе координат // *Цифровая обработка сигналов*. 2023. №4. С. 41–46.
8. Vucetic B., Jinhong Y. *Space-Time Coding*. John Wiley & Sons, 2003. 302 p.
9. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. *Технология MIMO: принципы и алгоритмы*. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 244 с.
10. Полушин П.А., Архипов В.В., Шалина Н.А. Модификация метода кодирования при борьбе с межсимвольными искажениями цифровых сигналов с модуляцией QPSK // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2023. №1. С. 33–40.
11. Паришин А.Ю., Нгуен В.Х. Оценка эффективности демодуляции сигналов MIMO системы связи при трехмерном моделировании расположения рассеивателей // 26-я международная конференция по цифровой обработке сигналов и ее приложениям (DSPA). 2024. С. 1–4.
12. Pavithra C., Muthumani B. Spatial channel modeling and analysis of channel capacity and path loss in wireless communication // *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2024. Vol. 6. No. 3. Pp. 933–940.
13. Паришин Ю.Н., Кудряшов В.И. Корреляционные свойства канальных коэффициентов MIMO системы связи с маневрирующим объектом // *Цифровая обработка сигналов*. 2015. №4. С. 20–23.
14. Greenstein L.J., Ghassemzadeh S., Erceg V., Michelson D.G. Ricean K-factors in narrowband fixed wireless channels: Theory, experiments, and statistical models // *IEEE Transactions on vehicular technology*. 2006. Vol. 58(8). Pp. 4000–4012.

Поступила 8 октября 2024 г.

English

INVESTIGATION OF DIFFERENTIAL CODING EFFICIENCY USING THREE-DIMENSIONAL SCATTERERS MODEL IN MIMO COMMUNICATION SYSTEM

Alexander Yuryevich Parshin — PhD in Engineering, Associate Professor of Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin (RSREU).

E-mail: parshin.a.y@rsreu.ru

Nguyen Van Khanh — Postgraduate student of Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin (RSREU).

E-mail: khanhkhanhkpr@gmail.com

Address: 390005, Russian Federation, Ryazan, Gagarina str., 59/1.

Abstract: The paper investigates the effectiveness of differential space-time coding for MIMO systems with a varying number of antennas under multipath conditions. A three-dimensional geometric scattering model is proposed to simulate the placement of scatterers between the transmitter and the receiver in accordance with the COST-259 standard. Scatterers near antenna systems significantly alter the amplitudes and phases of the propagated signals. The results of a comparative analysis demonstrate the noise immunity of a MIMO system using phase modulation as a function of the received signal-to-noise ratio (SNR). The obtained results help justify the choice of antenna configuration and its optimal placement to achieve the required bit error rate in the presence of scatterers.

Keywords: energy efficiency, spectral efficiency, signal-code structures, space-time coding, modeling, HF channel, MIMO.

References

1. *Claude O., Bruno C.* MIMO Wireless Communications From real-world propagation to space-time code design. Technology & Engineering, 2010. 480 p.
2. *Hochwald B.M., Marzetta T.L.* Unitary space-time modulation for multiple antenna communications in Rayleigh flat fading. IEEE Trans. Inform. Theory. 2000. Vol. 46. No. 2. Pp. 543–564.
3. *Tarokh V., Jafarkhani H.* A differential detection scheme for transmits diversity. IEEE J. Select. Areas Commun. 2000. Vol.18. No.7. Pp. 1169–1174.
4. *Parshin A.Yu., Nguyen V.Kh.* Performance analysis of MIMO communications system with differential coding in the presence of scatterers. Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University. 2024. No. 89. Pp. 3–11.
5. *Tokar M.S., Ryabov I.V.* Differential space-time block coding method for application in mobile radio communication systems using MIMO technology. Journal of Radio electronics. 2021. No. 6.
6. *Gavrilov V.M., Nikitin O.R., Smirnov D.S.* Investigation of the effect of a radio transparent fairing on the characteristics of multi-element radio engineering systems. Radio engineering and telecommunication systems. 2022. No. 1. Pp. 62–69.
7. *Parshin A. Yu., Nguyen V. Kh.* Model development and classification of MIMO communication channels in 3D coordinates. Digital signal processing. 2023. No. 4. Pp. 41–46.
8. *Vucetic B., Jinhong Y.* Space-Time Coding. John Wiley & Sons, 2003. 302 p.
9. *Bakulin M.G., Varukina L.A., Krejndelin V.B.* MIMO Technology: principles and algorithms. Goryachaya liniya – Telecom, 2014. 244 p.
10. *Polushin P.A., Arkhipov N.A., Shalina V.V.* Coding method modification in combatting intersymbol distortions of digital QPSK modulations signals. Radio engineering and telecommunication systems. 2023. No. 1. Pp. 33–40.
11. *Parshin A. Yu., Nguyen V. Kh.* Evaluation of the Demodulation Efficiency for MIMO Communication System Signals Under Three-Dimensional Modeling of Scatterer Locations. 26th International conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). 2024. Pp. 1–4.
12. *Pavithra C., Muthumani B.* Spatial channel modeling and analysis of channel capacity and path loss in wireless communication. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. 2024. Vol. 6. No. 3. Pp. 933–940.
13. *Parshin Yu.N., Kudryashov V.I.* Correlation properties of MIMO communication system channel coefficients with maneuvering object. Digital signal processing. 2015. No. 4. Pp. 20–23.
14. *Greenstein L.J., Ghassemzadeh S., Erceg V., Michelson D.G.* Ricean K-factors in narrowband fixed wireless channels: Theory, experiments, and statistical models. IEEE Transactions on vehicular technology. 2006. vol. 58(8). Pp. 4000–4012.