

УДК 621.396

## АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ МІМО СИСТЕМ ПРИ НАЛИЧИИ КОРРЕЛЯЦИИ КАНАЛЬНЫХ МАТРИЦ

**Ю. Н. Паршин**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой РТУ РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0003-0061-7804, e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru

**В. Д. Фам**, аспирант РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0009-0000-4984-6136, e-mail: phamducvn95@gmail.com

*Представлен анализ влияния коррелированной канальной матрицы и числа источников помех на эффективность функционирования систем МІМО. Основная цель настоящей работы заключается в исследовании систем МІМО с применением пространственно-временного кодирования и увеличенного числа антенн в условиях воздействия коррелированных помех с целью разработки методов повышения производительности системы. Степень корреляции между элементами канальной матрицы, а также количество источников помех используются в качестве основы для оценки вероятности битовой ошибки. Результаты моделирования подтверждают, что пространственная корреляция, возникающая вследствие многолучевого распространения сигнала, приводит к значительной деградации характеристик системы передачи информации. Полученные данные указывают на необходимость учета указанных факторов при проектировании систем МІМО, особенно в условиях плотной городской застройки и ограниченного пространства.*

**Ключевые слова:** корреляция канальной матрицы, пространственно-временная матрица, вероятности битовой ошибки, МІМО, число источников, помеха, рассеиватели, коэффициент Райса.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2026-95-16-26

### Введение

Функционирование современных беспроводных систем связи неразрывно связано с проблемой воздействия помех, в том числе коррелированных, что делает обеспечение их надежности и эффективности актуальной научной задачей. Традиционные методы обработки сигналов, оперирующие исключительно в пространственной или временной области, обладают фундаментальными ограничениями, не позволяющими одновременно компенсировать воздействие помех и эффективно использовать доступную полосу частот [1, 2]. В этой связи особое внимание уделяется технологиям пространственно-временного блочного кодирования (ПВБК) для МІМО систем. Использование ПВБК позволяет реализовать выигрыш пространственного разнесения за счёт совместной обработки сигналов в пространственной и временной областях, что существенно повышает устойчивость системы к замираниям и помеховым воздействиям. Основы ортогонального ПВБК были заложены в работе Аламоути для двух передающих антенн и впоследствии обобщены в трудах Тароха, Джафархани и Калдербанка для произвольного числа антенн ( $N_{\text{Tx}} > 2$ ) [3-6]. Тем не менее, проектирование оптимальных кодовых конструкций остается нетривиальной задачей. С увеличением числа антенных элементов и переходом к реальным условиям распространения радиоволн, эффективность системы начинает существенно зависеть от характеристик канала, в частности, от совокупного влияния многолучевости и пространственной корреляции коэффициентов канальной матрицы [7-10]. В данном контексте основной задачей исследования выступает анализ влияния корреляционных характеристик канала и помех на эффективность систем МІМО высокого порядка, использующих пространственно-временное кодирование, а также количественная оценка их устойчивости к помехам.

**Целью работы** является исследование влияния факторов, содержащихся в матрице корреляции канала, а также количества источников помех на вероятность битовой ошибки в си-

стеме ММО при использовании пространственного кодирования с увеличенным числом антенн в условиях наличия помех.

### Модели коррелированных канальных матриц

Пусть дана система ММО, включающая  $N_{TX}$  передающих,  $N_{RX}$  приемных антенн и  $M$  источников помех. Матрица принимаемого сигнала размером  $N_{RX} \times P$  на выходе приемных антенн описывается как сумма полезного сигнала и помехи:  $\underline{Y} = \underline{H}\underline{X} + \underline{Z}$ , где  $\underline{H}$  – матрица коэффициентов передачи сигнала размером  $N_{RX} \times N_{TX}$ ,  $\underline{X}$  –  $N_{TX} \times P$  матрица передаваемых символов,  $\underline{Z} = \underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{III}$  –  $N_{RX} \times P$  матрица помехи,  $\underline{Z}_{II}$  –  $N_{RX} \times P$  матрица пространственно коррелированных помех,  $\underline{Z}_{III}$  –  $N_{RX} \times P$  матрица пространственно некоррелированного шума,  $P$  – число временных слотов.

Корреляция канальных матриц  $\underline{H}$  возникает вследствие наличия общих рассеивателей для различных путей распространения сигнала. Существует ряд подходов к моделированию таких каналов  $\underline{H}$  [6]. В данной работе рассматривается метод, использующий априорную информацию о корреляционной матрице коэффициентов передачи. Для описания пространственной корреляции применяется модель, не требующая детального знания геометрического расположения рассеивателей [6]:

$$\underline{R}_{TX(RX)} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{TX(RX)} & \rho_{TX(RX)}^4 & \dots & \rho_{TX(RX)}^{(N_{TX(RX)}-1)^2} \\ \rho_{TX(RX)} & 1 & \rho_{TX(RX)} & \dots & \vdots \\ \rho_{TX(RX)}^4 & \rho_{TX(RX)} & 1 & \dots & \rho_{TX(RX)}^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \rho_{TX(RX)} \\ \rho_{TX(RX)}^{(N_{TX(RX)}-1)^2} & \dots & \rho_{TX(RX)}^4 & \rho_{TX(RX)} & 1 \end{pmatrix},$$

где  $\underline{R}_{TX}$ ,  $\underline{R}_{RX}$  – корреляционные матрицы сигналов в передающих и приемных антеннах

ММО системы,  $\rho_{TX(RX)} \approx \exp\left(-23\Delta^2 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2\right)$  – коэффициент корреляции сигнала в передающей и приемной антенных системах;  $0 < \Delta < 1$  – коэффициент, характеризующий ширину углового сектора принимаемого сигнала,  $d$  – расстояние между соседними антенными элементами [13].

Для формального описания корреляции между коэффициентами каналов различных источников сигналов и помех используется обобщенная корреляционная матрица сигналов по всем передающим антеннам:

$$\underline{R}_{TXM} = \begin{pmatrix} \underline{R}_{TX} & \rho_{TX1}\mathbf{E} & \rho_{TX2}\mathbf{E} & \dots & \rho_{TXM}\mathbf{E} \\ \rho_{TX1}\mathbf{E} & \underline{R}_1 & \rho_{12}\mathbf{E} & \dots & \rho_{1M}\mathbf{E} \\ \rho_{TX2}\mathbf{E} & \rho_{21}\mathbf{E} & \underline{R}_2 & \dots & \rho_{2M}\mathbf{E} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{TXM}\mathbf{E} & \rho_{M1}\mathbf{E} & \rho_{M2}\mathbf{E} & \dots & \underline{R}_M \end{pmatrix},$$

где  $\rho_{mn} \approx \exp\left(-23\Delta^2 \left(\frac{d_{mn}}{\lambda}\right)^2\right)$  – коэффициент корреляции между  $n$ -м и  $m$ -м источниками

помех;  $\rho_{TXm} \approx \exp\left(-23\Delta^2 \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2\right)$  – коэффициент корреляции между источником полезного сигнала и  $m$ -м источником помех [13];  $0 < \Delta < 1$  – коэффициент, характеризующий ширину

углового сектора принимаемого сигнала;  $d_{mn}$  – расстояния между  $m$ -м и  $n$ -м источниками помех;  $d_{TXm}$  – расстояния между  $m$ -м источником помех и передатчиком сигнала,  $\mathbf{E}$  – матрица, все элементы которой равны единице.

Матрица передачи, описывающая коэффициенты передачи сигнала и помехи к приемным антеннам определяется по формуле:

$$\mathbf{H}_{\text{TXM,RX}} = \mathbf{R}_{\text{RX}}^{1/2} \mathbf{H}_1 \mathbf{R}_{\text{TXM}}^{1/2},$$

где  $\mathbf{H}_1$  – матрица независимых гауссовских случайных величин размером  $N_{\text{RX}} \times \left( N_{\text{TX}} + \sum_{m=1}^M N_m \right)$ .

Матрица коэффициентов канала, описывающая совместный вклад компонентов прямого луча и диффузного рассеяния радиоволн, формируется как суперпозиция двух составляющих матриц размером  $N_{\text{TX}} \times N_{\text{RX}}$  и принимает следующую форму:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{K_{\text{RS}}}{K_{\text{RS}} + 1}} \mathbf{H}_{\text{LS}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{RS}} + 1}} \mathbf{H}_{\text{DF}},$$

где  $K_{\text{RS}}$  – фактор Райса для сигнала;  $\mathbf{H}_{\text{LS}}$  – канальная матрица для прямого луча между передатчиком и приемником;  $\mathbf{H}_{\text{DF}} = \mathbf{H}_{\text{TXM,RX}} (1 : N_{\text{RX}}, 1 : N_{\text{TX}})$  – диффузная канальная матрица для сигнала.

Канальная матрица для прямого луча между передатчиком и приемником имеет следующий вид:

$$\mathbf{H}_{\text{LS}} = \left\{ h_{\text{LSnm}} = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} R_{nm}}, n = 1, \dots, N_{\text{RX}}; m = 1, \dots, N_{\text{TX}} \right\},$$

где  $R_{nm}$  – расстояние между  $n$ -й приемной и  $m$ -й передающими антеннами;  $\lambda$  – длина волны.

Для источника помех матрица коэффициентов передачи от передатчика помех к приёмнику записывается в следующем виде:

$$\mathbf{H}_{\text{Vm}} = \sqrt{\frac{K_{\text{RVm}}}{K_{\text{RVm}} + 1}} \mathbf{H}_{\text{LSm}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{RVm}} + 1}} \mathbf{H}_{\text{DFm}},$$

где  $K_{\text{RVm}}$  – фактор Райса для помехи;  $\mathbf{H}_{\text{LSm}}$  – канальная матрица размером  $N_{\text{RX}} \times N_{\text{TXm}}$  прямого луча между источником помех и приемником;

$\mathbf{H}_{\text{DFm}} = \mathbf{H}_{\text{TXM,RX}} \left( 1 : N_{\text{RX}}, N_{\text{TX}} + \sum_{k=1}^{m-1} N_k + 1 : N_{\text{TX}} + \sum_{k=1}^m N_k \right)$  – диффузная канальная матрица помехи размером  $N_{\text{RX}} \times N_{\text{TXm}}$ ,  $N_{\text{TXm}}$  – число антенн источника помехи,  $m = 1, \dots, M$  – номер помехи.

При использовании ПВБК  $K$  информационных символов образуют кодовую матрицу  $\mathbf{S}$  размером  $N_{\text{TX}} \times P$ , где параметр  $P$  определяет количество временных интервалов, требуемых для передачи одного блока данных [12]. Ключевым показателем эффективности данного метода является скорость кодирования  $R = \frac{K}{P}$ .

В источнике [6] рассматриваются ортогональные пространственно-временные блочные коды, обеспечивающие максимальную скорость  $R = 1$  при различных конфигурациях передающих антенн:

$$\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 \\ -\underline{s}_2^* & \underline{s}_1^* \end{bmatrix}, \mathbf{S}_4 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 & \underline{s}_4 \\ -\underline{s}_2^* & \underline{s}_1^* & -\underline{s}_4^* & \underline{s}_3^* \\ -\underline{s}_3^* & \underline{s}_4^* & \underline{s}_1^* & -\underline{s}_2^* \\ -\underline{s}_4^* & -\underline{s}_3^* & \underline{s}_2^* & \underline{s}_1^* \end{bmatrix}.$$

Существуют и другие схемы пространственно-временного кодирования для систем ММО, обеспечивающие максимальный порядок разнесения при произвольном числе передающих антенн. Однако существенным недостатком таких схем является снижение скорости кодирования

$R < 1$ , обычно  $R = \frac{1}{2}$  или  $R = \frac{3}{4}$ . Для обеспечения ортогональности в системах с  $N_{TX} = 3; 4; 5$

в работах [5, 11] предложены кодовые матрицы со скоростью кодирования  $R = \frac{1}{2}$ :

$$\mathbf{S}_3 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 \\ -\underline{s}_2 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_4 \\ -\underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_1 \\ -\underline{s}_4 & -\underline{s}_3 & \underline{s}_2 \\ \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 \\ -\underline{s}_2 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_4 \\ -\underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_1 \\ -\underline{s}_4 & -\underline{s}_3 & \underline{s}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_4 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 & \underline{s}_4 \\ -\underline{s}_2 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_4 & \underline{s}_3 \\ -\underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_2 \\ -\underline{s}_4 & -\underline{s}_3 & \underline{s}_2 & \underline{s}_1 \\ \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 & \underline{s}_4 \\ -\underline{s}_2 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_4 & \underline{s}_3 \\ -\underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_2 \\ -\underline{s}_4 & -\underline{s}_3 & \underline{s}_2 & \underline{s}_1 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_5 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_5 \\ -\underline{s}_2 & \underline{s}_1 & \underline{s}_4 & -\underline{s}_3 & 0 \\ -\underline{s}_3 & -\underline{s}_4 & \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & 0 \\ -\underline{s}_4 & \underline{s}_3 & -\underline{s}_2 & \underline{s}_1 & 0 \\ -\underline{s}_5 & 0 & 0 & 0 & \underline{s}_1 \\ 0 & -\underline{s}_5 & 0 & 0 & \underline{s}_2 \\ 0 & 0 & -\underline{s}_5 & 0 & \underline{s}_3 \\ 0 & 0 & 0 & -\underline{s}_5 & \underline{s}_4 \\ -\underline{s}_1 & -\underline{s}_2 & -\underline{s}_3 & -\underline{s}_4 & -\underline{s}_5 \\ \underline{s}_2 & -\underline{s}_1 & -\underline{s}_4 & \underline{s}_3 & 0 \end{bmatrix}.$$

Комплексные ортогональные пространственно-временные коды со скоростью кодирования  $R = \frac{3}{4}$  существуют только для систем с  $N_{TX} = 3; 4$ , приведены в работе [11] и имеют вид:

$$\mathbf{S}_3 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 \\ -\underline{s}_2^* & \underline{s}_1 & 0 \\ -\underline{s}_3^* & 0 & \underline{s}_1 \\ 0 & -\underline{s}_3^* & \underline{s}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{S}_4 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 & 0 \\ -\underline{s}_2^* & \underline{s}_1 & 0 & \underline{s}_3 \\ -\underline{s}_3^* & 0 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_2 \\ 0 & -\underline{s}_3^* & \underline{s}_2 & \underline{s}_1 \end{bmatrix}.$$

Согласно теореме Тароха – Джафархани – Кальдербанка в работе [5] при числе передающих антенн  $N_{TX} > 4$  максимальная достижимая скорость комплексных ортогональных кодов ограничивается значением  $R \leq \frac{1}{2}$ . Поэтому для балансировки скорости передачи и порядка разнесения используются другие коды ПВБК. К таким ПВБК относятся, например, коды с  $N_{TX} > 4$  и скоростью передачи  $R > \frac{1}{2}$ :

$$R = \frac{3}{4}, \mathbf{S}_5 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_5 \\ -\underline{s}_2 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_4 & \underline{s}_3 & \underline{s}_6 \\ -\underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_2 & -\underline{s}_5 \\ -\underline{s}_4 & -\underline{s}_3 & \underline{s}_2 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_6 \\ -\underline{s}_5 & -\underline{s}_6 & 0 & 0 & \underline{s}_1 \\ \underline{s}_6 & -\underline{s}_5 & 0 & 0 & \underline{s}_2 \\ 0 & 0 & -\underline{s}_5 & -\underline{s}_6 & \underline{s}_3 \\ 0 & 0 & \underline{s}_6 & -\underline{s}_5 & \underline{s}_4 \end{bmatrix}, R = \frac{5}{8}, \mathbf{S}_5 = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 & \underline{s}_2 & \underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_5 \\ -\underline{s}_2 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_4 & \underline{s}_3 & 0 \\ -\underline{s}_3 & \underline{s}_4 & \underline{s}_1 & -\underline{s}_2 & 0 \\ -\underline{s}_4 & -\underline{s}_3 & \underline{s}_2 & \underline{s}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{s}_5 \\ -\underline{s}_5 & 0 & 0 & 0 & \underline{s}_1 \\ 0 & -\underline{s}_5 & 0 & 0 & \underline{s}_2 \\ 0 & 0 & -\underline{s}_5 & 0 & \underline{s}_3 \end{bmatrix}.$$

В рамках рассматриваемой модели на приёмной стороне сигнал, принимаемый каждой из  $N_{RX}$  приёмных антенн, регистрируется в течение  $P$  последовательных тактовых интервалов, соответствующих временной длительности одного блока пространственно-временного кода. Совокупность отсчётов, полученных каждой приёмной антенной, формирует вектор-строку

размерности  $1 \times P$ :  $\underline{\mathbf{Y}}_m = \sqrt{\frac{q_s}{N_{TX}}} \underline{\mathbf{H}}_m \underline{\mathbf{S}}^T + \underline{\mathbf{Z}}_m$ , где  $m = 1, \dots, N_{RX}$  – номер приемных антенн;  $\underline{\mathbf{H}}_m$  –

$m$ -я строка матрицы  $\underline{\mathbf{H}}$ ;  $\underline{\mathbf{Z}}_m$  –  $m$ -я строка матрицы помехи  $\underline{\mathbf{Z}}$ ;  $q_s$  – отношение сигнал-шум.

На основе алгебраических свойств кодовой матрицы для каждой группы символов формируется эквивалентная система линейных уравнений. Для пространственного декодирования формирование наблюдаемого процесса представляется в виде матричного преобразования:

$\underline{\mathbf{Y}}_m = \underline{\mathbf{A}}_m \underline{\mathbf{S}}_x + \underline{\mathbf{Z}}_m$ , где  $\underline{\mathbf{A}}_m = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{A}} \\ \mathbf{J} \underline{\mathbf{A}}^* \end{bmatrix}$  – матрица системы размерности  $2K \times 2P$  для  $m$ -й приемной антенны, построенная на основе структуры кодовой матрицы и оценок пространственно-временного канала;  $\mathbf{J}$  – матрица перестановки столбцов, зависящая от структуры ПВБК;  $\underline{\mathbf{S}}_x = [\underline{s}_1, \underline{s}_2, \dots, \underline{s}_K, \underline{s}_1^*, \underline{s}_2^*, \dots, \underline{s}_K^*]^T$  – расширенный вектор неизвестных символов.

Матрица  $\underline{\mathbf{A}}$ , полученная в результате применения ортогональных пространственно-временных блочных кодов при скорости кодирования  $R = \frac{1}{2}$  и  $R = \frac{3}{4}$ , для  $N_{TX} = 3, 4, 5$  формируется с учётом структуры пространственно-временного кодирования и соответствующих оценок канала и в явном аналитическом виде может быть представлена следующим образом:

$$R = \frac{1}{2}, \underline{\mathbf{S}}_3 : \underline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & 0 & -\underline{h}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_3 & 0 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & 0 & -\underline{h}_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & 0 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_2 & -\underline{h}_1 \end{bmatrix},$$

$$R = \frac{1}{2}, \underline{\mathbf{S}}_4 : \underline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & \underline{h}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_4 & -\underline{h}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_3 & -\underline{h}_4 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_4 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & \underline{h}_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_4 & -\underline{h}_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_4 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_4 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_2 & -\underline{h}_1 \end{bmatrix},$$

$$R = \frac{1}{2}, \underline{\mathbf{S}}_5 : \underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & \underline{h}_4 & \underline{h}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & -\underline{h}_4 & \underline{h}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_3 & \underline{h}_4 & -\underline{h}_1 & -\underline{h}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_4 & -\underline{h}_3 & \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \underline{h}_5 & 0 & 0 & 0 & -\underline{h}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{h}_5 & 0 & 0 & -\underline{h}_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{h}_5 & 0 & -\underline{h}_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{h}_5 & -\underline{h}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{h}_1 & -\underline{h}_2 & -\underline{h}_3 & -\underline{h}_4 & -\underline{h}_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{h}_2 & \underline{h}_1 & \underline{h}_4 & -\underline{h}_3 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R = \frac{3}{4}, \underline{\mathbf{S}}_3 : \underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & 0 & -\underline{h}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_2 \end{pmatrix},$$

$$R = \frac{3}{4}, \underline{\mathbf{S}}_4 : \underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{h}_4 & \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & 0 \\ 0 & -\underline{h}_4 & 0 & \underline{h}_3 & 0 & -\underline{h}_1 \\ \underline{h}_4 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_2 \end{pmatrix}.$$

Аналогично рассматривается матрица  $\underline{\mathbf{A}}$ , полученная из кодовых матриц, не относящихся к типу ортогональных пространственно-временных блочных кодов, форма которой представляется следующим образом:

$$R = \frac{3}{4}, \underline{\mathbf{S}}_5 : \underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & \underline{h}_4 & \underline{h}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_5 & \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_4 & -\underline{h}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_4 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_2 & -\underline{h}_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\underline{h}_1 & 0 & 0 & \underline{h}_4 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_2 & 0 & 0 & -\underline{h}_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{h}_1 & 0 & \underline{h}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{h}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_1 & 0 & \underline{h}_5 & 0 & 0 & -\underline{h}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_5 & 0 & -\underline{h}_3 & -\underline{h}_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_5 & -\underline{h}_4 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R = \frac{5}{8}, \underline{\mathbf{S}}_5 : \underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \underline{h}_1 & \underline{h}_2 & \underline{h}_3 & \underline{h}_4 & \underline{h}_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_4 & -\underline{h}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_4 & -\underline{h}_1 & \underline{h}_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_4 & \underline{h}_3 & -\underline{h}_2 & -\underline{h}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{h}_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_5 & 0 & 0 & 0 & -\underline{h}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_5 & 0 & 0 & -\underline{h}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{h}_5 & 0 & -\underline{h}_3 \end{pmatrix}.$$

Из полученного выражения следует, что решение обратной задачи оценивания сигнального вектора в смысле критерия минимума среднеквадратичной ошибки может быть получе-

но путём применения операции псевдообращения соответствующей матрицы  $\underline{\mathbf{A}}_m^+ = (\underline{\mathbf{A}}_m^H \underline{\mathbf{A}}_m)^{-1} \underline{\mathbf{A}}_m^H$ :

$$\hat{\underline{\mathbf{S}}}_{xm} = \underline{\mathbf{A}}_m^+ \underline{\mathbf{Y}}_m.$$

На выходе приёмника формируется суммарный сигнал, являющийся суперпозицией результатов пространственной обработки сигналов, поступающих на каждую приёмную антенну:

$$\hat{\underline{\mathbf{S}}}_x = \sum_{m=1}^{N_{RX}} \hat{\underline{\mathbf{S}}}_{xm}.$$

Для повышения достоверности оценивания сигнальных символов применяется метод, основанный на совместной обработке самих информационных символов и их сопряженных пространственно-временных копий:

$$\hat{\underline{\mathbf{S}}}(1:K) = \frac{1}{2} \left[ \hat{\underline{\mathbf{S}}}_x(1:K) + \hat{\underline{\mathbf{S}}}_x^*(K+1:2K) \right].$$

В условиях наличия помех эффективность системы ММО оценивается вероятностью битовой ошибки при различных значениях параметров, определяющих её значение. При достаточно большом числе переданных бит вероятность битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$  определяется как доля ошибочных битов в общем объёме переданных данных:

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{N_{\text{ош}}}{N_{\text{bit}}},$$

где  $N_{\text{ош}}$  – число бит, полученных с ошибкой;  $N_{\text{bit}}$  – общее число переданных бит.

Эффективность системы ММО с пространственно-временным кодированием анализируется посредством исследования зависимости вероятности ошибки битов от различных влияющих параметров: число приёмных антенн  $N_{RX}$ , отношение сигнал-шум  $q_s = \frac{P_s}{P_N}$ , отношение помеха-шум  $q_v = \frac{P_v}{P_N}$ , фактор Райса для сигнала и помехи, где  $P_s$  – мощность сигналов, излучаемых всеми передающими антеннами,  $P_N$  – мощность шума в приёмных антеннах,  $P_v$  – мощность помехи.

### Экспериментальные исследования

Анализ эффективности системы ММО в настоящей работе выполнен с применением метода имитационного моделирования. Для построения модели рассматриваемой системы были заданы следующие параметры: количество антенн источника помехи  $N_m = 1$ ; отношение сигнал-шум  $q_s = 10$  дБ; отношение помеха-шум  $q_v = 50$  дБ; коэффициент Райса для сигнала  $K_{RS} = 0; 5; 10; 50; 100$ ; коэффициент Райса для помехи  $K_{RV} = 0; 5; 10; 50; 100$ . Координаты антенн, выраженные в длинах волн, равны:  $x_{\text{TX}0} = x_{\text{TX}1} = \dots = x_{\text{TX}n} = 0$ ,  $y_{\text{TX}0} = 0$ ,  $y_{\text{TX}n} = y_{\text{TX}0} + (n-1)d$ ,  $n = 1, \dots, N_{\text{TX}}$ ,  $x_{\text{RX}0} = \dots = x_{\text{RX}n-1} = 500\lambda$ ,  $y_{\text{RX}0} = 70\lambda$ ,  $y_{\text{RX}m} = y_{\text{RX}0} + (m-1)d$ ,  $m = 1, \dots, N_{\text{RX}}$ ,  $x_{v1} = 300\lambda$ ,  $x_{v2} = 250\lambda$ ,  $x_{v3} = 150\lambda$ ,  $x_{v4} = 300\lambda$ ,  $x_{v5} = 300\lambda$ ,  $y_{v1} = -200\lambda$ ,  $y_{v2} = -150\lambda$ ,  $y_{v3} = 30\lambda$ ,  $y_{v4} = 70\lambda$ ,  $y_{v4} = -110\lambda$ ;  $d = 0,5\lambda$  – расстояние между соседними элементами антенн.

Зависимости вероятности битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$  от числа приёмных антенн  $N_{RX}$  при различных значениях числа источников помех  $M$  показаны на рисунке 1. Анализ графиков показывает, что вероятность битовой ошибки остается неизменной, пока число приемных антенн не превышает количество источников помех ( $N_{RX} \leq M$ ). Снижение вероятности битовой ошибки наблюдается только при выполнении условия  $N_{RX} > M$  и также при дальнейшем

увеличении  $N_{RX}$ . Кроме того, при одинаковой скорости кодирования  $R = \frac{1}{2}$  увеличение числа передающих антенн приводит к увеличению вероятности битовой ошибки. Тем самым подтверждается, что увеличение числа антенн на приёмной стороне способствует повышению эффективности и надёжности системы связи.

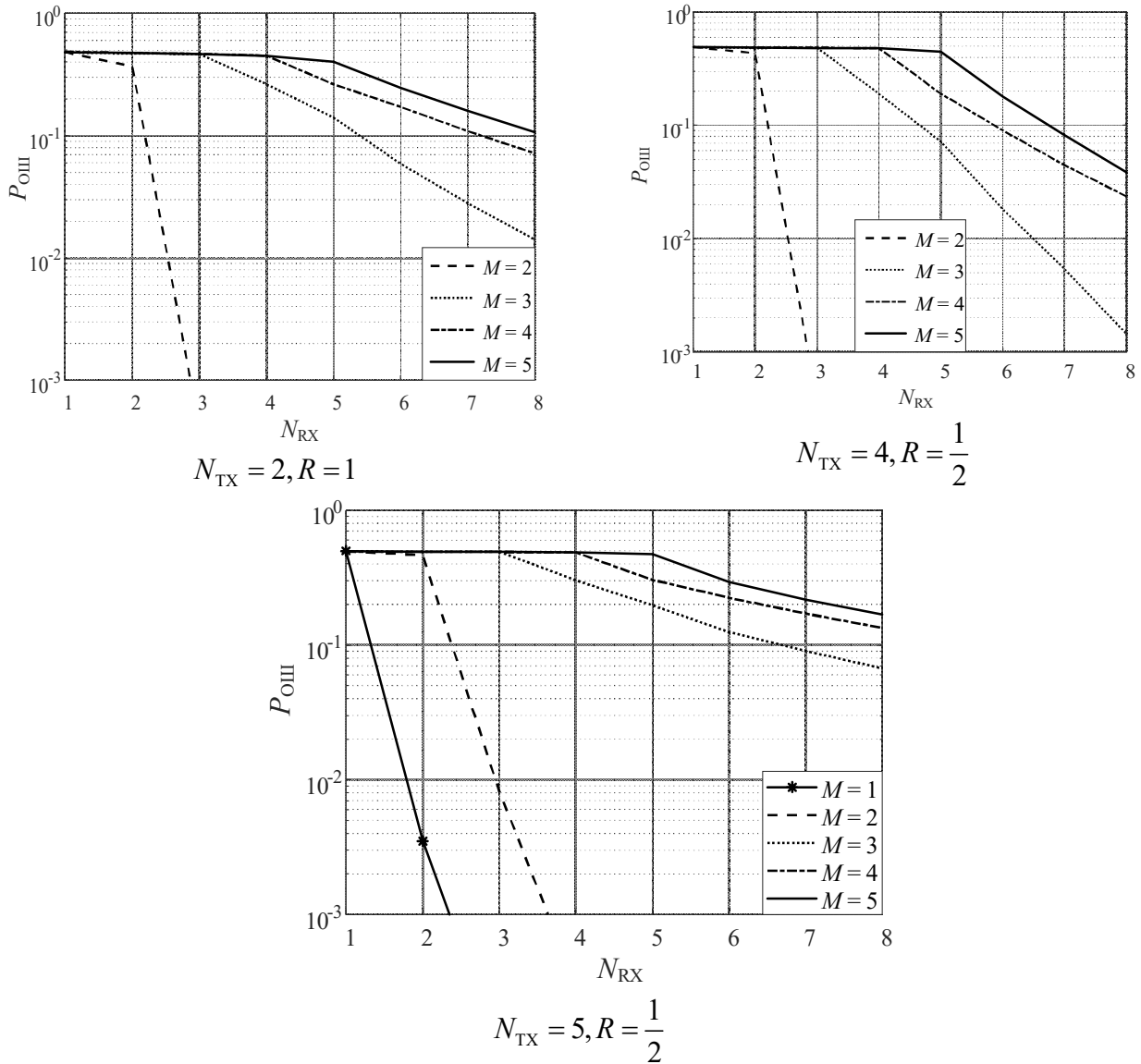


Рисунок 1 – Зависимости  $P_{ош}$  от  $N_{RX}$  при различных значениях  $M$

Figure 1 – Dependence of  $P_{ош}$  on  $N_{RX}$  at different values of  $M$

На рисунке 2 приведены зависимости вероятности битовой ошибки  $P_{ош}$  от числа приёмных антенн  $N_{RX}$  при различных значениях коэффициента Райса для сигнала  $K_{RS}$ . Из графика видно, что вероятность битовой ошибки монотонно увеличивается с ростом коэффициента Райса для сигнала  $K_{RS}$ . Кроме того, снижение скорости пространственно-временного кода с  $R = \frac{3}{4}$  до  $R = \frac{1}{2}$  приводит к уменьшению вероятности битовой ошибки. Это соответствует теории ПВБК, поскольку уменьшение скорости кода позволяет использовать более высокий порядок разнесения и увеличить энергию на один бит, что в конечном итоге повышает надёжность системы.

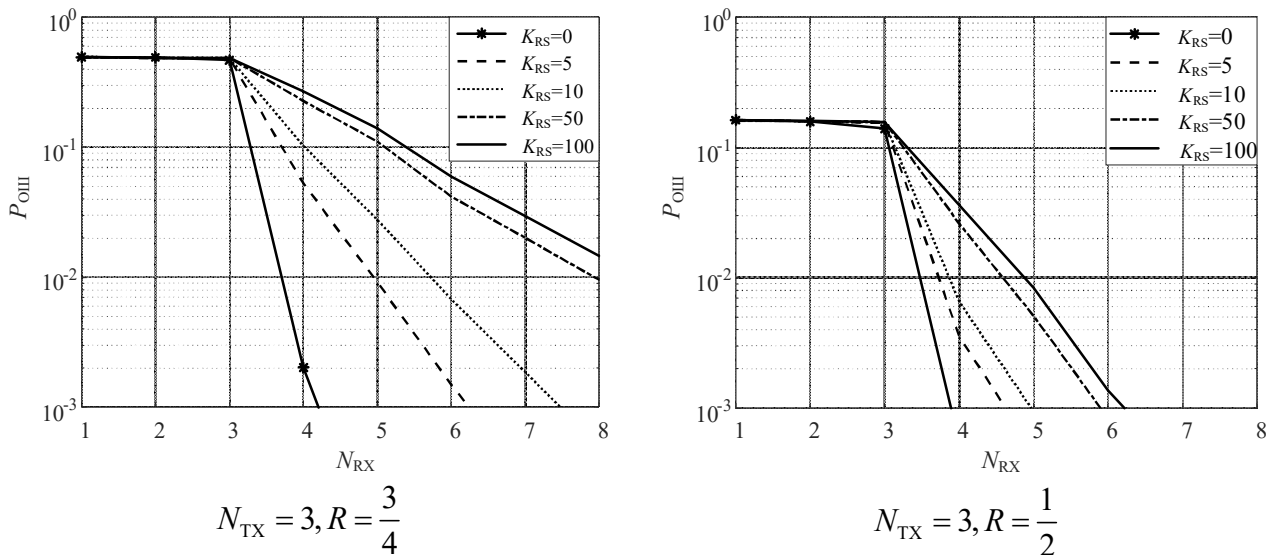


Рисунок 2 - Зависимости  $P_{\text{ош}}$  от  $N_{\text{RX}}$  при различных значениях  $K_{\text{RS}}$

Figure 2 – Dependence of  $P_{\text{ош}}$  on  $N_{\text{RX}}$  at different values of  $K_{\text{RS}}$

### Заключение

В данной работе проведен анализ влияния корреляции канальных матриц и числа источников помех на эффективность ММО систем пространственно-временного кодирования с большим числом антенн в условиях помех. Исследование выполнено методом статистического моделирования с использованием вероятности битовой ошибки в качестве основной метрики качества передачи. В рамках исследования рассмотрены различные конфигурации числа передающих и приёмных антенн, а также проанализировано влияние числа источников помех и коэффициента Райса для помех на характеристики системы.

На основе результатов, представленных на рисунках 1 и 2, можно сделать следующие выводы. Увеличение числа приёмных антенн  $N_{\text{RX}}$  обеспечивает снижение вероятности битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$ , что обусловлено ростом порядка пространственного разнесения. Характерно, что величина вероятности битовой ошибки  $P_{\text{ош}}$  остается неизменной, пока число приемных антенн не превышает количества источников помех ( $N_{\text{RX}} \leq M$ ). Эффективное снижение вероятности битовой ошибки наблюдается только при выполнении условия  $N_{\text{RX}} > M$ . Тем самым подтверждается, что увеличение числа антенн на приёмной стороне способствует повышению эффективности и надёжности системы связи. Установлено, что уменьшение скорости пространственно-временного кодирования приводит к уменьшению вероятности битовой ошибки.

В результате исследования показано, что оптимизация конфигурации приемных антенн в соответствии с числом источников помех в ММО системах с пространственно-временным кодированием повышает помехоустойчивость и надёжность в условиях коррелированных канальных матриц сигнала и помехи.

### Библиографический список

1. **Kuhn V.** Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems. John Wiley & Sons, 2006. 404 p.
2. **Telatar I.E.** Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels // European Transactions on Telecommunication. 1999. Vol. 10. No. 6. Pp. 585-595.
3. **Alamouti S.** A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1998. Vol. 16. No. 8. Pp. 1451-1458.

4. Yan Q., Zeng H., Jiang T., Li M., Lou W., Thomas Hou Y. MIMO-based Jamming Resilient Communication in Wireless Networks // IEEE Conference on Computer Communications. 2014. Pp. 2697-2705.
5. Tarokh V., Jafarkhani H. and Calderbank A.R. Space-time Block Codes from Orthogonal Designs // IEEE Transactions on Information Theory. 1999. Vol. 45. No. 5. Pp. 1456-1467.
6. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 244 с.
7. Паршин Ю.Н., Фам В.Д. Влияние корреляции канальных матриц на эффективность ММО системы при действии многолучевых помех // Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2025). 2025. Т. 2. С. 399-405.
8. Паршин Ю.Н., Нгуен В.Н.Т. Влияние пространственной структуры на пропускную способность беспроводных ММО систем при наличии помех // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 9-14.
9. Паршин Ю.Н., Фам В.Д. Влияние корреляции канальных матриц на пропускную способность ММО системы при действии многолучевых помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 93. С. 31-40.
10. Паршин Ю.Н., Фам В.Д. Анализ вероятности ошибки приёма сигналов в ММО-системе аламоути при наличии коррелированных помех // Новые информационные технологии в научных исследованиях НИТ-2025: сб. тр. XXX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025. С. 150-152.
11. Swapnil T. Patil, Pratap N. Shinde. A Review of Space-Time Block Codes from Real and Complex Orthogonal Designs // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). Vol. 100. No. 11. 2014. Pp. 16-19.
12. Паршин Ю.Н. Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех. М.: КУРС, 2021. 200 с.
13. Durgin G.D., Rappaport T.S. Effects of Multipath Angular Spread on the Spatial Cross-Correlation of Received Voltage Envelopes // 49th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). 1999. Vol. 2. Pp. 996-1000.

UDC 621.396

## NOISE IMMUNITY ANALYSIS OF MIMO SYSTEMS WITH CHANNEL MATRICES CORRELATION

**Yu. N. Parshin**, Dr. in technical sciences, full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0003-0061-7804, e-mail: [parshin.y.n@rsreu.ru](mailto:parshin.y.n@rsreu.ru)

**V. D. Pham**, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0009-0000-4984-6136, e-mail: [phamducvn95@gmail.com](mailto:phamducvn95@gmail.com)

*This paper presents the analysis for the impact of a correlated channel matrix and the number of interference sources on MIMO systems performance. The main aim of the study is to carry out computer simulations of MIMO systems employing space-time coding and increased number of antennas under correlated interference conditions, as well as to identify methods for improving their performance. Bit error probability is evaluated using statistical simulation of the correlating channel matrix coefficients and the number of interference sources. The application of spatial coding in multi-antenna systems is shown to improve interference robustness and the efficiency of channel usage in the presence of concentrated interference. Simulation results confirm that spatial correlation arising from multipath signal propagation leads to significant degradation of information transmission system performance. The obtained results indicate the necessity of taking these factors into account in MIMO systems design, especially under conditions of dense urban environments and limited spatial constraints.*

**Keywords:** channel matrix correlation, space-time matrix, bit error probability, MIMO, number of interference, scatterers, Rice factor.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2026-95-16-26

### References

1. **Kuhn V.** Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems. *John Wiley & Sons*. 2006. 404 p.
2. **Telatar I.E.** Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. *European Transactions on Telecommunication*. 1999, vol. 10, no 6, pp. 585-595.
3. **S. Alamouti.** A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1998, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458.
4. **Yan Q., Zeng H., Jiang T., Li M., Lou W., Thomas Hou Y.** MIMO-based Jamming Resilient Communication in Wireless Networks. *IEEE Conference on Computer Communications*. 2014, pp. 2697-2705.
5. **Tarokh V., Jafarkhani H. and Calderbank A.R.** Space-time Block Codes from Orthogonal Designs. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1999, vol. 45, no. 5, pp. 1456-1467.
6. **Bakulin M.G., Varukina L. A., Kreindelin V. B.** *MIMO Technology: Principles and Algorithms*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom. 2014, 244 p. (in Russian).
7. **Parshin Yu.N., Fam V.D.** Impact of channel matrix correlation on the efficiency of a MIMO system under multipath interference. *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz' (RLNC-2025)*. 2025, vol. 2, pp. 399-405. (in Russian).
8. **Parshin Yu.N., Nguyen V.N.T.** Influence of Spatial Structure on the Capacity of Wireless MIMO Systems in the Presence of Interference. *Digital Signal Processing*. 2023, no. 2, pp. 9-14. (in Russian).
9. **Parshin Yu.N., Fam V.D.** Vliyaniye korrelyatsii kanal'nyh matric na propusknyuyu sposobnost' MIMO sistemy pri dejstvii mnogoluchevykh pomekh. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2025, no. 93, pp. 31-40. (in Russian).
10. **Parshin Yu.N., Pham V.D.** Analysis of bit error probability in an Alamouti MIMO system under correlated interference. *New Information Technologies in Scientific Research (NIT-2025): Proceedings of the XXX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists*, Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University. 2025, pp. 150-152. (in Russian).
11. **Patil S.T., Shinde P.N.** A review of space-time block codes from real and complex orthogonal designs. *International Journal of Computer Applications*. 2014, vol. 100, no. 11, pp. 16-19.
12. **Parshin Yu.N.** *Space-Time Signal Processing and Interference Cancellation*. Moscow: KURS, 2021. 200 p. (in Russian).
13. **Durgin G.D., Rappaport T.S.** Effects of Multipath Angular Spread on the Spatial Cross-Correlation of Received Voltage Envelopes. *49th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*. 1999, vol. 2, pp. 996-1000.