

УДК 621.396

ВЛИЯНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ КАНАЛЬНЫХ МАТРИЦ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ММО СИСТЕМЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ МНОГОЛУЧЕВЫХ ПОМЕХ

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

Проводится анализ влияния коррелированной канальной матрицы на эффективность системы ММО. Основной целью исследования является анализ взаимосвязи между корреляцией канальной матрицы и пропускной способностью системы ММО в условиях многолучевых помех. Используется метод статистического моделирования корреляции коэффициентов канальной матрицы для анализа эргодической пропускной способности системы ММО. Установлено, что при увеличении степени корреляции между элементами передачи сигнала и матрицы помех наблюдается систематическое снижение пропускной способности. Результаты моделирования подтверждают, что пространственная корреляция, возникающая в условиях многолучевого распространения, значительно ухудшает характеристики системы передачи информации. Это определяет необходимость учитывать данные факторы при проектировании ММО систем, особенно в условиях плотной городской застройки и ограниченного пространства.

Ключевые слова: корреляция канальной матрицы, пропускная способность, ММО, многолучевая помеха, рассеиватели, угловой спектр, коэффициент Райса, ширина углового спектра.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-31-40

Введение

Технология беспроводной связи становится все более совершенной и современной, чтобы удовлетворить растущие потребности общества в передаче информации. Однако наряду с этим всегда существуют определенные проблемы, связанные с искажениями сигнала из-за многолучевого распространения сигналов и наличия помех от различных источников радиопомех. Для решения этих проблем проведено множество исследований, результатом которых стало создание прорывной технологии ММО (Multiple Input Multiple Output), позволяющей значительно улучшить спектральную эффективность, а также повысить надежность канала [1-4]. Однако на практике на производительность систем ММО по-прежнему негативно влияют многие факторы, включая многолучевые помехи и наличие пространственной корреляции между каналами передачи. Наличие многолучевых помех может существенно снизить пропускную способность системы, особенно когда направление распространения сигнала и направление источников помех совпадают, что приводит к ухудшению качества связи в системе.

В предыдущих исследованиях влияние пространственно коррелированных помех рассматривалось в основном со стороны прямого луча [5-8]. В работе [9] исследовалось совместное действие пространственно коррелированной и пространственно некоррелированной помех и определены условия их эффективной компенсации. Анализировалось влияние многолучевых помех на производительность систем ММО, предполагая, что матрицы каналов между источниками излучения некоррелированы. Кроме того, в работах [10-14] корреляционные модели были также построены для случая электромагнитных волн, излучаемых из одного источника. Однако в реальных условиях, особенно в городских условиях, на процесс распространения волн часто оказывают влияние различные мешающие объекты, что приво-

дит к высокой корреляции между коэффициентами канальной матрицы. Для этого требуются комплексные модели оценки, которые более полно отражают влияние корреляции каналов в условиях многолучевых помех.

Целью работы является анализ влияния корреляции канальных матриц сигнала и помех, а также коэффициентов Райса на пропускную способность ММО системы передачи информации с целью увеличения пропускной способности системы при действии многолучевых помех и пространственной корреляции каналов сигнала и помех.

Модели коррелированных канальных матриц

На рисунке 1 показана общая модель связи системы ММО, состоящая из N_{TX} передающих антенн, N_{RX} приемных антенн и M источников помех. Тогда вектор наблюдаемого процесса $\underline{Y}$ на выходах приемных антенн имеет вид: $\underline{Y} = \underline{H}\underline{S} + \underline{V}$, где $\underline{H}$ – матрица коэффициентов передачи сигнала; $\underline{S}$ – вектор-столбец передаваемых символов, $\underline{V} = \underline{V}_{\Pi} + \underline{V}_{III}$ – вектор – столбец помех; $\underline{V}_{\Pi}$ – вектор пространственно коррелированных помех; $\underline{V}_{III}$ – вектор пространственно некоррелированного шума.

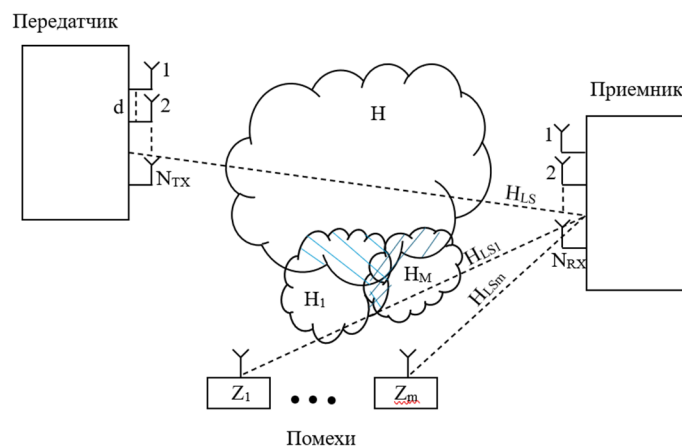


Рисунок 1 – Пространственная структура ММО системы
Figure 1 – Spatial structure of MIMO system

Предположим, что в модели пространственно коррелированная помеха формируется M независимыми источниками. Тогда коррелированная помеха определяется выражением

$$\underline{V}_{\Pi} = \sum_{m=1}^M \underline{V}_m = \sum_{m=1}^M \underline{H}_m \underline{L}_m, \text{ где } \underline{H}_m - \text{канальная матрица } m\text{-го источника помехи; } \underline{L}_m - \text{вектор}$$

помех в N_m передатчиках m -го источника помехи. Предположим, что помехи в антеннах каждого передатчика представляет собой независимые гауссовские величины. Тогда корреляционная матрица помехи в приемных антеннах:

$$\underline{R}_m = \overline{\underline{V}_m \underline{V}_m^H} = \underline{H}_m \begin{bmatrix} P_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & P_M \end{bmatrix} \underline{H}_m^H,$$

где P_m – дисперсия помехи в m -й передающей антенне.

В условиях действия многолучевых помех рассматриваются две различные модели сигнально-помеховой обстановки для анализа пропускной способности системы ММО. Это дает больше возможностей для поиска модели, подходящей для каждой индивидуальной задачи. Матрица корреляции коэффициентов канала представлена следующим выражением [1, 3]

$$\underline{R}_{MIMO} = \underline{R}_{TX} \otimes \underline{R}_{RX}, \text{ где } \otimes - \text{знак кронекеровского произведения; } \underline{R}_{TX}, \underline{R}_{RX} - \text{корреляцион-}$$

ные матрицы сигналов в передающих и приемных антеннах ММО системы. Эти матрицы можно определить различными способами. В качестве первой модели рассмотрим экспоненциальную модель корреляции. В этой модели мы определим их на основе расположения и расстояния между антеннами [3].

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

где $\rho_{\text{TX(RX)}}$ – коэффициент корреляции передающего и приемного сигнала. Данная модель отличается наглядностью, так как показывает, что корреляция сигналов в антеннах ослабевает с ростом расстояния между ними $\rho_{\text{TX(RX)}} \approx \exp(-23\Delta^2 d/\lambda)$, где Δ – размер углового сектора прихода сигнала, λ – длина волны [3].

Для моделирования корреляции сигналов в передающих антеннах сигнала и помех введём матрицу их совместной корреляции, охватывающую сигналы на всех передающих антеннах:

$$\underline{\mathbf{R}}_{\text{TXm}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{R}}_{\text{TX}} & \rho_1 \mathbf{J} & \rho_2 \mathbf{J} & \cdots & \rho_M \mathbf{J} \\ \rho_1 \mathbf{J} & \underline{\mathbf{R}}_1 & \rho_{12} \mathbf{J} & \cdots & \vdots \\ \rho_2 \mathbf{J} & \rho_1 \mathbf{J} & \underline{\mathbf{R}}_2 & \cdots & \rho_{(M-2)M} \mathbf{J} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \rho_{(M-1)M} \mathbf{J} \\ \rho_M \mathbf{J} & \cdots & \rho_{(M-2)M} \mathbf{J} & \rho_{(M-1)M} \mathbf{J} & \underline{\mathbf{R}}_M \end{bmatrix},$$

где ρ_{nm} – коэффициент корреляции сигналов n -й и m -й антенных систем источников помех и источника сигналов; $\mathbf{J}$ – единичная матрица.

Матрицу коэффициентов передачи от антенн, передающих сигнал и помехи к приемным антеннам, представим следующим образом:

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

где $\underline{\mathbf{H}}_{\text{rand}} - N_{\text{RX}} \times \left(N_{\text{TX}} + \sum_{m=1}^M N_m \right)$ матрица независимых гауссовских случайных чисел.

В качестве второй модели рассмотрим модель, основанную на угловом спектре мощности рассеивателей (рисунок 2).

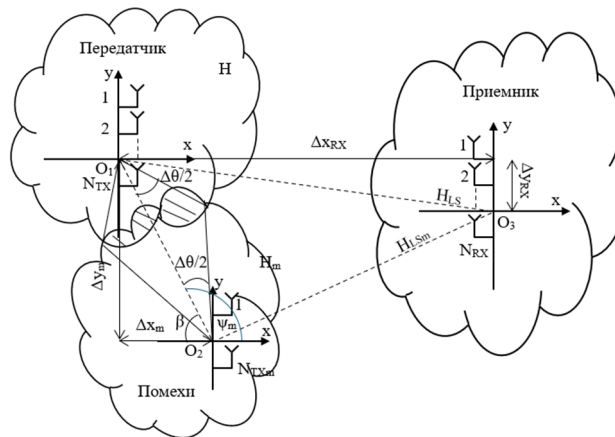


Рисунок 2 – Модель канала с угловым спектром мощности рассеивателей
Figure 2 – Channel model based on angular power spectrum of scatterers

В данной модели канал характеризуется пространственной корреляцией, обусловленной взаимным расположением рассеивателей и антенн. Предполагается, что вблизи каждой приёмной антенны расположены источники рассеяния, суммарная мощность которых формирует угловой спектр $p_{RX}(\theta)$ [1, 15]. Корреляционные матрицы для сигнала и помех на стороне передачи, приёма и источника помех обозначаются как $\underline{\mathbf{R}}_{TX}$, $\underline{\mathbf{R}}_{RX}$, $\underline{\mathbf{R}}_M$ и могут быть представлены в следующей форме:

$$\begin{aligned}\underline{\mathbf{R}}_{TX} &= \left\{ r_{TXm_1n_1} = \overline{h_{im_1} h_{in_1}^*}, m_1, n_1 = 1, \dots, N_{TX} \right\} = \int_0^{2\pi} p_{TX}(\theta_{k_1}) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(y_{n_1}-y_{m_1})\sin\theta_{k_1}} d\theta_{k_1}, \\ \underline{\mathbf{R}}_M &= \left\{ r_{Mm_2n_2} = \overline{h_{vm_2} h_{vn_2}^*}, m_2, n_2 = 1, \dots, N_M \right\} = \int_0^{2\pi} p_M(\theta_{k_2}) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(y_{n_2}-y_{m_2})\sin\theta_{k_2}} d\theta_{k_2}, \\ \underline{\mathbf{R}}_{RX} &= \left\{ r_{RXm_3n_3} = \overline{h_{n_3i} h_{m_3i}^*}, m_3, n_3 = 1, \dots, N_{RX} \right\} = \int_0^{2\pi} p_{RX}(\theta_{k_3}) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(y_{n_3}-y_{m_3})\sin\theta_{k_3}} d\theta_{k_3},\end{aligned}$$

где h_{im_1} – коэффициент канала от m_1 -й передающей антенны, соответствующий лучу i ; h_{vm_2} – коэффициент канала от m_2 -й передающей антенны, соответствующий лучу v ; h_{n_3i} – коэффициент канала, полученный n_3 -й антенной приёмника от i -го луча; $p(\theta)$ – угловой спектр; θ – направление на рассеиватель углового спектра. Элементы этих матриц могут быть вычислены через интегральную зависимость от углового спектра:

$$r_{nm} = \int_0^{2\pi} p(\theta) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(y_n-y_m)\sin\theta} d\theta \approx \sum_{k=1}^K p(\theta_k) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(y_n-y_m)\sin\theta_k} \Delta\theta_k,$$

где y_n, y_m – координаты элементов антенной системы; λ – длина волны; $\Delta\theta_k$ – шаг угловой координаты.

Рассмотрим ситуацию, в которой пространственно коррелированная помеха исходит от одного источника $M = 1$. При таких условиях корреляционная матрица сигналов на передающих антеннах как сигнального передатчика, так и источника помехи принимает блочную форму:

$$\underline{\mathbf{R}}_{TXM} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{R}}_{TX} & \underline{\mathbf{R}}_{TXM} \\ \underline{\mathbf{R}}_{TXM}^H & \underline{\mathbf{R}}_M \end{bmatrix}.$$

Матрица взаимной корреляции сигналов между антеннами передатчика полезного сигнала и антеннами источника помехи определяется следующим выражением:

$$\underline{\mathbf{R}}_{TXM} = \sum_{k=1}^{K_1} \underline{\mathbf{S}}_{TXk} \underline{\mathbf{S}}_{mk}^H = \sum_{k=1}^{K_1} \sum_{k_1=1}^{N_{TX}} \sum_{k_2=1}^{N_M} D_k e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(y_{TXk_1}\sin\theta_{TXk_1} - y_{mk_2}\sin\theta_{mk_2})},$$

где $\underline{\mathbf{S}}_{TXk}$, $\underline{\mathbf{S}}_{mk}$ – комплексные векторы сигнала от k -го рассеивателя; D_k – мощность сигнала от k -го рассеивателя, y_{TX}, y_m – координаты элементов антенн. K_1 – число рассеивателей, одинаковых для передающей антенной системы сигнала и помехи. Диапазон угловых координат общих рассеивателей определяется в том числе взаимным расположением передающих антенн сигнала и помехи: $\theta_{TX(m)k} = \psi_{TX(m)} - \frac{\Delta\theta}{2}, \dots, \psi_{TX(m)} + \frac{\Delta\theta}{2}$, где $\Delta\theta$ – ширина углового сектора расположения K_1 рассеивателей; $\psi_{TX} = 2\pi - \beta$, $\psi_m = \pi - \beta$ – угловое положение середин угловых секторов, где $\beta = \arctg\left(\frac{\Delta y_m}{\Delta x_m}\right)$ – взаимная угловая ориентация направлений излучения антенн сигнала и помехи (рисунок 2).

Исходя из статистической структуры канала, корреляционная матрица коэффициентов канала подвергается разложению Холецкого, что позволяет корректно моделировать взаимо-

зависимости между элементами канального вектора: $\mathbf{R}_{\text{MIMO}} = \mathbf{C}\mathbf{C}^H$. Моделирование $N_{\text{TXM}}N_{\text{RX}} \times 1$ вектора канальных коэффициентов осуществляется с помощью: $\mathbf{H}_{\text{rand}} = \mathbf{C}\mathbf{V}$, где $\mathbf{V} = [v_1 \cdots v_{N_{\text{TXM}}} v_{N_{\text{RX}}}]^T$ – вектор независимых комплексных гауссовских чисел с $|v_i|^2 = 1$.

В условиях практической эксплуатации радиоканалы часто характеризуется многолучевым распространением, при котором передаваемый сигнал распространяется как по прямому пути, так и за счет переотраженных компонент. При наличии линии прямой видимости между передатчиком и приемником канал может быть описан моделью Райса. В этом случае итоговая канальная матрица представляет собой суперпозицию регулярной и диффузной составляющих $\mathbf{H} = \sqrt{\frac{K_{\text{RS}}}{K_{\text{RS}} + 1}} \mathbf{H}_{\text{LS}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{RS}} + 1}} \mathbf{H}_{\text{DF}}$, где K_{RS} – коэффициент Райса для сигнала, $\mathbf{H}_{\text{LS}}$ – канальная матрица для прямого луча сигнала, $\mathbf{H}_{\text{DF}}$ – диффузная составляющая канальной матрицы для сигнала.

Канальная матрица для условий прямой видимости, характеризующая распространение сигнала только по прямому пути между передающей и приемной антеннами, имеет следующий вид:

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

где R_{nm} – расстояние между n -й приемной и m -й передающей антеннами, λ – длина волны.

Аналогичным образом, передаточная матрица, детерминирующая закономерности распространения интерференционных сигналов в тракте «передатчик-приёмник», представляется в следующей форме: $\mathbf{H}_{\text{Vm}} = \sqrt{\frac{K_{\text{RVm}}}{K_{\text{RVm}} + 1}} \mathbf{H}_{\text{LSm}} + \sqrt{\frac{1}{K_{\text{RVm}} + 1}} \mathbf{H}_{\text{DFm}}$, где K_{RVm} – коэффициент Райса для помехи; $\mathbf{H}_{\text{LSm}}$ – канальный вектор размера $N_{\text{RX}} \times N_{\text{M}}$ прямого пути между источником помех и приемником; $\mathbf{H}_{\text{DFm}}$ – диффузная канальная матрица помехи размером $N_{\text{RX}} \times N_{\text{M}}$, N_{M} – количество передающих антенн источника помехи, $m = 1, \dots, M$ – номер помехи.

Прямой канал между источником помех и приёмником моделируется с помощью матрицы размера $N_{\text{RX}} \times N_{\text{M}}$, которая имеет следующий вид:

$$\mathbf{H}_{\text{LSm}} = \left\{ h_{\text{LS}nv} = e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} R_{nv}}, n = 1, \dots, N_{\text{RX}}; v = 1, \dots, N_{\text{M}} \right\},$$

где R_{nv} – расстояние между n -й приемной и v -й передающей антеннами источника помех; λ – длина волны

Полная корреляционная матрица помехи складывается из двух отдельных матриц, одна из которых описывает коррелированную компоненту, а другая – некоррелированную: $\mathbf{R}_{\text{V}} = \mathbf{R}_{\text{II}} + \mathbf{R}_{\text{III}}$, где $\mathbf{R}_{\text{II}} = \sum_{m=1}^M P_m \mathbf{H}_m \mathbf{H}_m^H$ – корреляционная матрица активной составляющей помехи, $\mathbf{R}_{\text{III}} = \mathbf{I} P_{\text{III}}$ – корреляционная матрица шумов помехи, которые являются пространственно некоррелированными; $\mathbf{I}$ – дисперсия шума в каждом приемном канале; P_{III} – дисперсия шума в каждом приемном канале.

Определение пропускной способности системы ММО, функционирующей в присутствии пространственно коррелированных помех, осуществляется посредством применения метода декоррелирующего фильтра [4]:

$$C_H = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_{\text{RX}}} + \frac{q_s}{N_{\text{TX}}} \mathbf{W} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \mathbf{W}^H \right),$$

где $q_s = \frac{P_s}{P_{\text{ш}}}$ – отношение сигнал-шум, P_s – сумма дисперсий сигналов в передающих антеннах; $\mathbf{I}_{N_{\text{RX}}}$ – единичная матрица размером $N_{\text{RX}} \times N_{\text{RX}}$; $\mathbf{W} = \sqrt{P_{\text{ш}}} [\text{Chol}(\mathbf{R}_v)]^{-1}$ – матрица коэффициентов декоррелирующего фильтра, получаемая разложением Холецкого.

Усредняя по K реализациям канальной матрицы, получаем количественную оценку пропускной способности:

$$C = \overline{C_H} = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K C_H(k).$$

Экспериментальные исследования

Проведем анализ эффективности ММО системы методом статистического моделирования. Для имитационного моделирования рассматриваемой системы в данной работе были использованы следующие основные исходные параметры: количество передающих антенн $N_{\text{TX}} = 4$; количество приемных антенн $N_{\text{RX}} = 4$; количество антенн источника помехи $N_m = 2$; количество источников помехи $M = 1$; отношение сигнал-шум $q_s = 10\text{дБ}$; расстояние между элементами антенн $d = 0,5\lambda$; $\Delta\theta = 30^\circ$; $K_1 = 200$; координаты антенн, выраженные в длинах волн, равны: $x_{\text{TX}0} = \dots = x_{\text{TX}N_{\text{TX}}-1} = 0$; $y_{\text{TX}0} = 0$; $y_{\text{TX}m} = y_{\text{TX}0} + md$, $m = 0, \dots, N_{\text{TX}} - 1$; $y_{\text{RX}n} = y_{\text{RX}0} + nd$, $n = 0, \dots, N_{\text{RX}} - 1$; $x_{\text{RX}0} = \dots = x_{\text{RX}N_{\text{RX}}-1} = 500\lambda$; $y_{\text{RX}0} = -70\lambda$; $x_{v0} = \dots = x_{N_m-1} = 300\lambda$; $y_{v0} = -20\lambda$; $y_{v\mu} = y_{v0} + v d$, $v = 0, \dots, N_m - 1$.

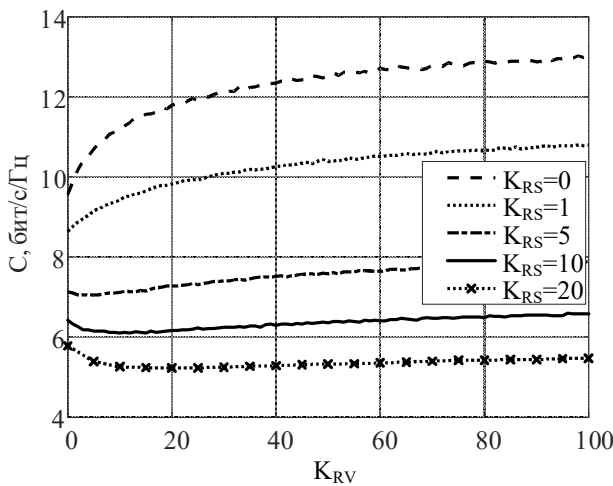


Рисунок 3 – Зависимости C от K_{RV} при различных значениях K_{RS}
Figure 3 – Dependence of C on K_{RV} at different values of K_{RS}

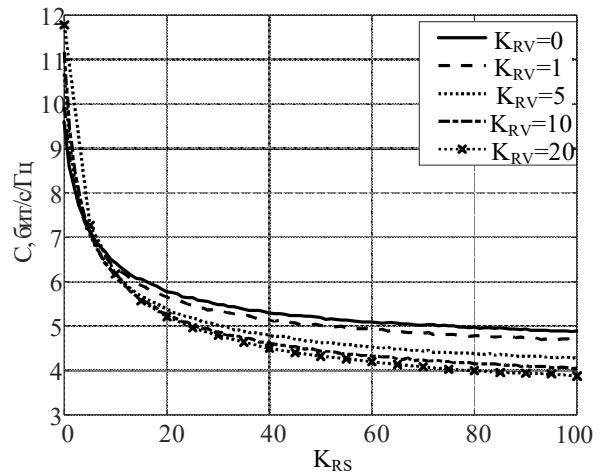


Рисунок 4 – Зависимости C от K_{RS} при различных значениях K_{RV}
Figure 4 – Dependence of C on K_{RS} at different values of K_{RV}

На рисунке 3 приведены зависимости пропускной способности C от коэффициента Райса для помехи K_{RV} при различных значениях коэффициента Райса для сигнала K_{RS} . Из графиков видно, что пропускная способность C уменьшается при увеличении K_{RV} в диапазоне от 0 до K_{RS} , после чего наблюдается её рост с дальнейшим увеличением K_{RV} . Это означает, что при большом значении K_{RV} компонент прямой видимости в помехе сильнее, помеховый сигнал стабилизируется и вызывает меньше случайных флуктуаций, благодаря чему система

способна более эффективно адаптироваться. При значении коэффициента Райса сигнала $K_{RS} = K_{RV}$ наблюдается минимальное значение пропускной способности.

На рисунке 4 приведены зависимости пропускной способности C от K_{RS} при различных фиксированных значениях K_{RV} . Здесь отчётливо видно, что при увеличении K_{RS} пропускная способность значительно снижается. Это подтверждает тот факт, что наличие сильной компоненты прямого луча в полезном канале снижает степень ортогональности между передаваемыми потоками и, как следствие, уменьшает мультиплексорный эффект ММО. Таким образом, наилучшие характеристики наблюдаются при K_{RS} и низких значениях K_{RV} , что соответствует сценарию с чистым рэлеевским замиранием и отсутствием прямых путей в канале помехи. Это подтверждает важность пространственного распределения и диффузности рассеивателей в формировании устойчивых ММО систем передачи информации.

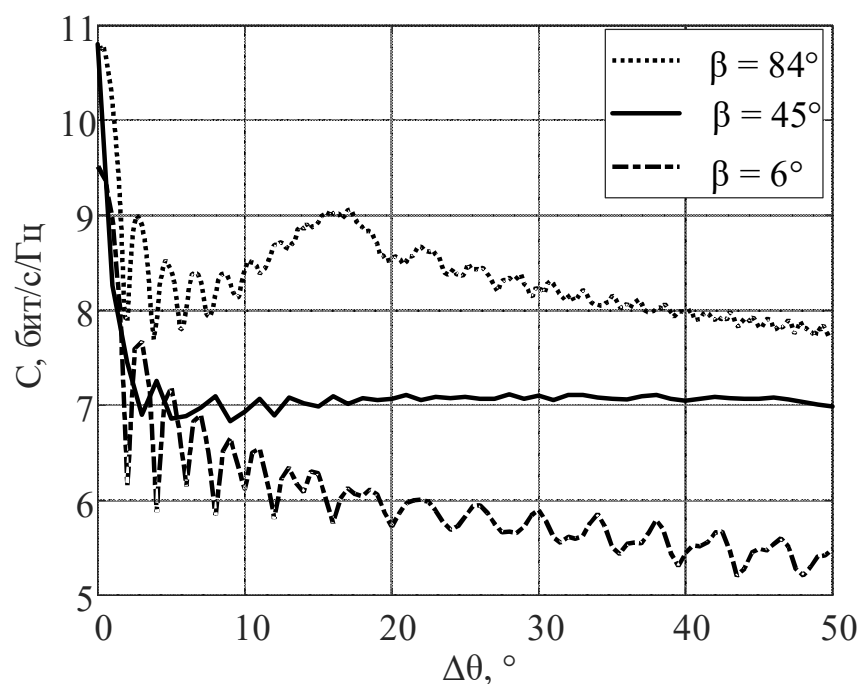


Рисунок 5 – Зависимости C от $\Delta\theta$ при различных значениях β

Figure 5 – Dependence of C on $\Delta\theta$ at different values of β

На рисунке 5 представлены зависимости эргодической пропускной способности C от ширины углового сектора $\Delta\theta$ расположения K_1 рассеивателей при различных значениях взаимной угловой ориентации направлений излучения β . Из графика видно, что при всех значениях β пропускная способность системы изменяется значительно с увеличением $\Delta\theta$. Общая тенденция заключается в резком снижении пропускной способности при малых значениях $\Delta\theta$, с последующим её постепенным уменьшением по мере увеличения $\Delta\theta$. При значениях β в диапазоне $0...90^\circ$, пропускная способность уменьшается с уменьшением угла β . При $\beta = 45^\circ$ показывает наиболее стабильный сценарий работы с точки зрения пропускной способности канала относительно изменений $\Delta\theta$, пропускная способность остается практически неизменной после первоначального резкого снижения. При $\beta = 84^\circ$ пропускная способность увеличивается после первоначального резкого снижения, а затем продолжает снижаться.

Заключение

В данной работе был проведён анализ эффективности ММО системы в условиях действия пространственно коррелированной направленной помехи. Исследование выполнено методом статистического моделирования с использованием эргодической пропускной способности в качестве основной метрики производительности. Рассматривался случай одной активной помехи, при различных комбинациях количества передающих, приёмных и помеховых антенн.

На основании результатов, представленных на рисунках 3 и 4, можно сделать следующие выводы: с увеличением коэффициента Райса для сигнала K_{RS} , пропускная способность системы существенно снижается. Это связано с уменьшением пространственного разнообразия вследствие доминирования прямой видимости в канале. В то же время по мере роста K_{RV} от 0 до K_{RS} пропускная способность C уменьшается, достигая минимума в точке $K_{RV} = K_{RS}$, а затем начинает возрастать при дальнейшем увеличении K_{RV} . Наилучшие показатели достигаются при $K_{RS} = 0$ и высоких значениях K_{RV} , что соответствует сценарию с рэлеевским замиранием и пространственно рассеянной помехой. Дополнительный анализ, представленный на рисунке 5, позволяет сделать вывод о критической роли угловой структуры каналов. Пропускная способность системы изменяется значительно с увеличением ширины углового сектора $\Delta\theta$ расположения K_1 рассеивателей при различных значениях взаимной угловой ориентации направлений излучения β : наблюдается резкое снижение при малых значениях $\Delta\theta$, с последующим постепенным уменьшением по мере увеличения $\Delta\theta$. При значениях β в диапазоне $0 \dots 90^\circ$ – чем больше β , тем больше пропускная способность.

Таким образом, результаты моделирования определяют необходимость пространственного управления в ММО системах, включая формирование оптимальных узконаправленных диаграмм направленности антенн, согласованных с формой углового спектра. Это особенно важно для повышения пропускной способности и устойчивости ММО систем в условиях ограниченного радиоресурса и многолучевого распространения.

Библиографический список

1. **Kuhn V.** Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems. John Wiley & Sons, 2006.
2. **Telatar I.E.** Capacity of multi-antenna Gaussian channels // European Transactions on Telecommunication. 1999. Vol. 10. No 6. Pp. 585-595.
3. **Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б.** Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком. 2014. 244 с.
4. **Паршин Ю.Н.** Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех. М.: КУРС. 2021. 200 с.
5. **Фам В.Д.** Компьютерное моделирование пропускной способности ММО системы при действии пространственно коррелированных помех // Сб. тр. XI Международной заочной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. (ITRT-2024)». С. 393-399.
6. **Паршин Ю.Н., Нгуен В.Н.Т.** Влияние количества элементов антенн на вероятности ошибки приема сигналов в беспроводных ММО системах при наличии помех // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 1. С. 78-84.
7. **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.
8. **Нгуен В.Н.Т.** Повышение эффективности схемы Аламоути в беспроводных ММО системах передачи информации при наличии помех // Сборник трудов. Том 1. V Международный научно-технический форум СТНО-2022. С. 122- 128.

9. Паршин Ю.Н., Буй К.В. Адаптивные алгоритмы обработки сигналов с разделением на пространственный и временной компоненты на фоне комплекса широкополосной и узкополосной помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 3-12.

10. Паршин Ю.Н., Фам В.Д. Влияние коэффициента Райса на эффективность ММО системы // Сборник XIII международной студенческой научной конференции «Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века», г. Ачинск, с. 152-157.

11. Паршин Ю.Н., Фам В.Д. Анализ пропускной способности ММО системы при действии пространственно коррелированных многолучевых помех // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025: сб. тр. VIII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.1 / под общ. ред. О.В. Миллоровой. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2021. С. 1-6.

12. 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, IEEE INFOCOM, 2014.

13. Zeng H., Cao C., Li H., Yan Q. Enabling jamming-resistant communication in wireless MIMO network // Proceedings of the IEEE Conference on Communications and Network Security. 2017. Pp. 1-9.

14. Поляков П.Ф. Прием сигналов в многолучевых каналах. М.: Радио и связь, 1986. 248 с.

15. Грачев М.В., Паршин Ю.Н. Исследование углового спектра мощности шумов многоканальной приемной системы с взаимным влиянием каналов и оптимизации нагрузочных импедансов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 3-12.

UDC 621.396

CORRELATION IMPACT OF CHANNEL MATRICES ON MIMO SYSTEMS CAPACITY UNDER MULTIPATH INTERFERENCE

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

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

This paper analyzes the impact of correlated channel matrices on MIMO systems efficiency. The main aim of the study is to examine the relationship between channel matrix correlation and MIMO system capacity under multipath interference. The article uses a statistical modeling approach to simulate the correlation coefficients of channel matrix for analyzing the ergodic capacity of MIMO systems. The analysis shows that an increase in correlation level between signal transmission elements and interference matrix leads to systematic decrease in capacity. Simulation results confirm that spatial correlation which arises in multipath propagation environments significantly degrades transmission performance. This highlights the importance of considering these factors when designing MIMO systems, especially in densely built urban environments and space-constrained areas.

Keywords: channel matrix correlation, capacity, MIMO, multipath interference, scatterers, angular spectrum, Rice coefficient, angular spectrum width.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-31-40

References

1. Kuhn V. Wireless Communications over MIMO Channels: Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems. John Wiley & Sons, 2006.
2. Telatar I.E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunication*. 1999, vol. 10, no 6, pp. 585-595.
3. Bakulin M.G., Varukina L.A., Kreyndelin V.B. *MIMO technology: principles and algorithms*. Moscow: Goryachaya Liniya-Telecom. 2014. 244 p.
4. Parshin Yu.N. *Prostranstvenno-vremennaja obrabotka signalov i kompensaciya pomех* (Spatial and time signal processing and interference compensation). Moscow: KURS. 2021. 200 p. (in Russian).

5. **Pham V.D.** Computer modeling of MIMO system capacity under spatially correlated interference, *XI Int. Correspondence Scientific-Technical Conference «Information Technology, Radioelectronics, Telecommunications (ITRT-2024)»*. Pp. 393-399.
6. **Parshin Yu.N., Nguyen V.N.T.** Influence of the number of antenna elements on the probability of signal reception errors in wireless MIMO systems in the presence of interference. *Journal of Theory and Technology of Radio Communication*. 2022, no 1, pp. 78-84.
7. **Parshin Yu.N., Nguyen V.N.T.** The 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.
8. **Nguyen V.N.T.** Schemes for increasing the efficiency of Alamouti in MIMO wireless information transmission systems in the presence of interference. *Collection of works. Volume 1. V International Scientific and Technical Forum STNO*. 2022, pp. 122-128.
9. **Parshin Y.N., Bui K.V.** Adaptive signal processing algorithms separating spatial and temporal components under broadband and narrowband interference. *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University*. 2025, issue 91, pp. 3-12.
10. **Parshin Y.N., Pham V.D.** Impact of Rician factor on MIMO system efficiency. *XIII International Student Scientific Conference «Scientific and Educational Potential of Youth in Solving Relevant Problems of the 21st Century»*, Achinsk, pp. 152-157.
11. **Parshin Y.N., Pham V.D.** Analysis of MIMO system capacity under spatially correlated multipath interference. *Modern Technologies in Science and Education – STNO-2025, VIII International Scientific and Technical Forum*, vol. 1, ed. O.V. Milovzorov, Ryazan State Radio Engineering University. 2021, pp. 1-6.
12. **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, IEEE INFOCOM*. 2014, pp. 2697-2705.
13. **Zeng H., Cao C., Li H., Yan Q.** Enabling jamming-resistant communication in wireless MIMO network. *Proceedings of the IEEE Conference on Communications and Network Security*. 2017, pp. 1-9.
14. **Polyakov P.F.** *Signal Reception in Multipath Channels*. Moscow: Radio and Svyaz, 1986, 248 p.
15. **Grachev M.V., Parshin Y.N.** Study of angular power spectrum of noise in multichannel receiving system with mutual channel influence and load impedance optimization. *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University*. 2022, no. 82, pp. 3-12.