

УДК 621.396.93

## ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ MIMO КАНАЛА С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

БАЛУТА М.Ю.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

## INTERFERENCE IMMUNITY OF TRANSMITTING SYSTEM OVER MIMO CHANNEL EVALUATION TAKING INTO ACCOUNT SPATIAL CORRELATION

BALUTA M.Y.

Odessa National Academy of Telecommunications n.a. A.S. Popov

*Аннотация.* В статье произведен анализ помехоустойчивости многоантенной системы передачи в релейском канале с общими замираниями с учетом пространственной корреляции.

*Abstract.* In this article the BER performance of transmitting MIMO system over rayleigh flat fading with influence of spatial correlation is analyzed.

Система передачи с использованием множества антенных массивов на обеих сторонах радиоканала (MIMO) позволяет достичь существенного увеличения пропускной способности по сравнению с SISO каналом. На сегодняшний день точное представление модели MIMO канала все еще является проблемой. В случае каналов с замираниями множество работ, например [1], рассматривали MIMO канал в виде одинаково и независимо распределенных гауссовских элементов матрицы. Такой канал является идеализированным допущением. Представление и влияние пространственной корреляции на приемной и передающей стороне на пропускную способность было показано в работах [2], [3]. В работах [4], [5] авторы используют кластерные модели для описания более полной картины MIMO канала. В [6] показано, что на практике реализация высокой производительности системы на основании MIMO канала чувствительна не только к пространственной корреляции, но и к рангу канальной матрицы, которая зависит от плотности отражателей среды распространения. В свою очередь большинство работ сводится к оценке пропускной способности и в меньшей степени к исследованию помехоустойчивости системы передачи на основании MIMO канала с учетом различных факторов. Таким образом, целью данной работы является исследование помехоустойчивости системы передачи на основе MIMO канала с учетом пространственной корреляции с использованием кластерного подхода при описании канала.

Вектор приемного сигнала основной полосы частот в дискретные моменты времени задается как

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор сигналов на входе канала размера  $n_T \times 1$ ;  $\mathbf{r}$  – вектор сигналов на выходе канала размера  $n_R \times 1$ ;  $\mathbf{H}$  – канальная матрица размера  $n_R \times n_T$ ;  $\mathbf{n}$  – вектор аддитивного белого гауссовского шума размера  $n_R \times 1$ .

Пространственно-временное кодирование (ПВК) – общий термин, используемый для обозначения схемы множественно антенной передачи, где модуляционные символы сопоставляются во времени и в пространстве. Принцип ПВК на основе схемы Аламоути [7] представлен на рис. 1.

Принцип работы схемы следующий: два символа  $x_1$  и  $x_2$  передаются одновременно от антенн 1 и 2 соответственно на протяжении длительности первого символа. На протяжении второго интервала передается  $-x_2^*$  и  $x_1$  через антенны 1 и 2 соответственно. (\* – означает комплексно сопряженное значение). Делается допущение, что канал с общими замираниями остается постоянным на протяжении двух последовательных символьных интервалов, и обозначается  $\mathbf{h} = [h_1, h_2]$ .

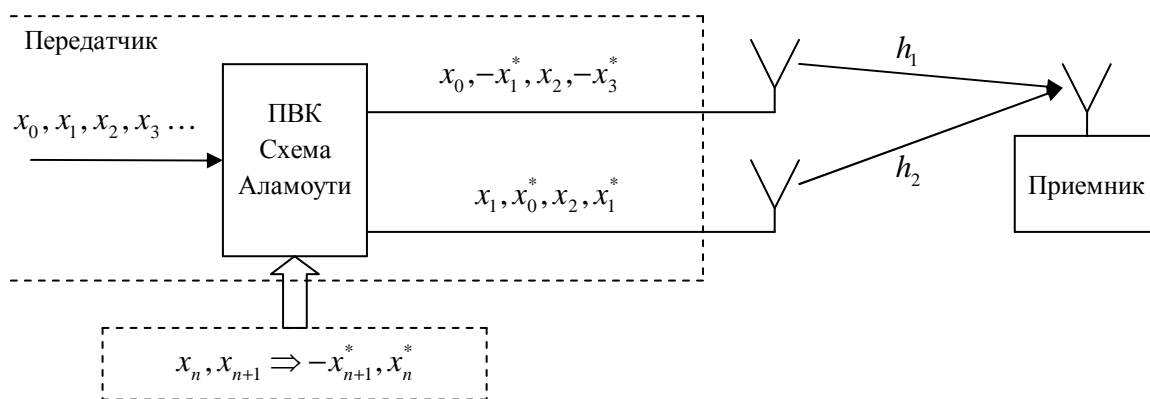


Рисунок 1 – Схема разнесенной передачи с ПВК

Символ  $r_1$ , принимаемый в первый временной интервал:

$$r_1 = \sqrt{E_s} h_1 \frac{x_1}{\sqrt{2}} + \sqrt{E_s} h_2 \frac{x_2}{\sqrt{2}} + n_1 \quad (2)$$

и символ  $r_2$ , принимаемый во второй интервал:

$$r_2 = -\sqrt{E_s} h_1 \frac{x_2^*}{\sqrt{2}} + \sqrt{E_s} h_2 \frac{x_1^*}{\sqrt{2}} + n_2, \quad (3)$$

где значение каждого символа разделено на  $\sqrt{2}$  так, что вектор  $\mathbf{x} = [x_1/\sqrt{2} \quad x_2/\sqrt{2}]$  имеет единичную среднюю энергию (предполагается, что  $x_1$  и  $x_2$  взяты из сигнального созвездия с единичной средней энергией), и  $n_1$  и  $n_2$  – АБГШ, вносимый в каждый символьный интервал.

Выражения (2) и (3) можно представить как

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{bmatrix} = \sqrt{E_s} \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1/\sqrt{2} \\ x_2/\sqrt{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Реальный ММО канал не является идеализированным релейским каналом с независимыми канальными коэффициентами. Есть различные факторы, снижающие пропускную способность, один из которых – пространственная корреляция. Корреляция между радиоволнами, пришедшими на два различных антенных элемента – это функция от углового спектра мощности, диаграммы направленности и разнесения антенн.

Обобщенная аналитическая модель Кронекера [8] точно отображает корреляционные свойства в канале для небольшого количества приемных и передающих антенн

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_R^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_T^{1/2}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{H}_w$  – матрица размера  $n_R \times n_T$  с одинаково и независимо распределенными гауссовскими величинами с нулевыми средними и единичными дисперсиями;  $\mathbf{R}_R$  и  $\mathbf{R}_T$  корреляционные матрицы между приемными и между передающими антеннами соответственно; верхний индекс 1/2 означает вычисление квадратного корня.

Корреляционная матрица канала

$$\mathbf{R}_H = \mathbf{R}_T \otimes \mathbf{R}_R, \quad (6)$$

где  $\otimes$  – означает произведение Кронекера.

На рис.2 представлена кластерная модель ММО канала.

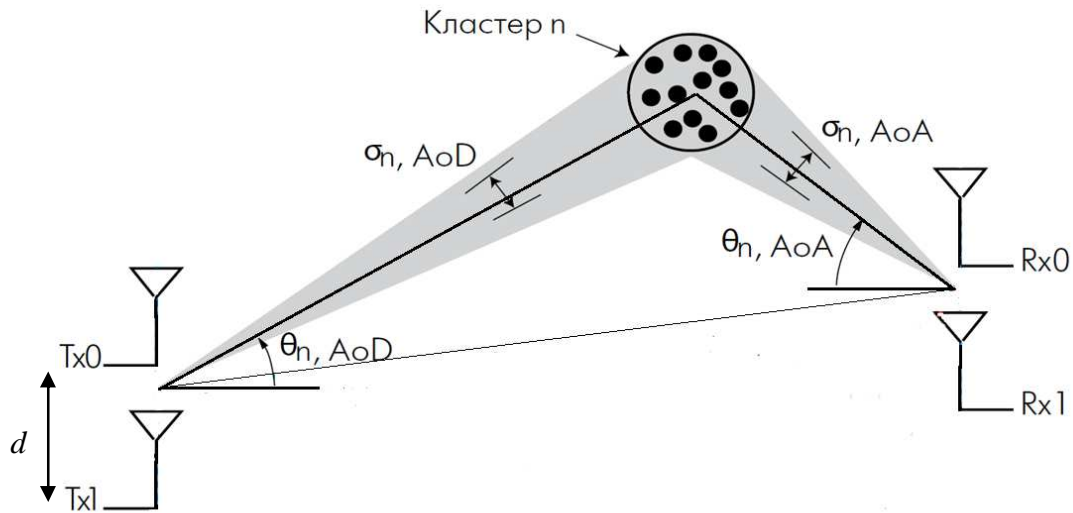


Рисунок 2 – Кластерная модель MIMO канала

Кластеры описываются следующими параметрами:

- углом излучения от передающих антенн  $\theta_{n, AoD}$  (AoD, angle of departure);
- углом падения к приемным антеннам  $\theta_{n, AoA}$  (AoA, angle of arrival);
- рассеянием  $\sigma_{n, AoD}$  и  $\sigma_{n, AoA}$ .

Усеченное выражение Лапласа для распределения угловой мощности спектра, которое является наиболее точным при описании MIMO канала аналитическими моделями, определяется следующим образом [4]

$$p(\theta) = \frac{\beta}{\sqrt{2\sigma}} e^{-\frac{|\sqrt{2}\theta|}{\sigma}} \quad -\pi \leq \theta \leq \pi, \quad (7)$$

где  $\beta$  – коэффициент нормировки плотности вероятности;  $\sigma$  – стандартное отклонение углового спектра мощности;  $\theta$  – переменная, описывающая AoA/AoD смещение относительно среднего угла.

Элементы матриц  $\mathbf{R}_R$  и  $\mathbf{R}_T$  характеризуются определенными значениями AoD/AoA и рассеянием излучения. Так как принцип вычисления коэффициентов матриц  $\mathbf{R}_R$  и  $\mathbf{R}_T$  одинаковый, то обозначим через  $\mathbf{R}$  матрицу, соответствующую и приемной, и передающей матрице. Тогда  $(m, n)$  элемент матрицы  $\mathbf{R}$  будет определяться выражением:

$$R_{m,n} = \int_{-\pi}^{\pi} e^{j[\Phi_m(\theta) - \Phi_n(\theta)]} p(\theta) d\theta, \quad (8)$$

где  $\Phi_m(\theta) - \Phi_n(\theta)$  – разность фаз между  $m$  и  $n$  антеннами за счет разнесения антенн.

Рассмотрим возможные методы детектирования.

Детектор максимального правдоподобия (Maximum likelihood, ML) – это оптимальный детектор, который находит  $\tilde{\mathbf{x}}$  как минимальное расстояние от  $\mathbf{x}$ :  $\tilde{\mathbf{x}} = \arg_x \min \|\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|$ . Отметим, что поиск нахождения правильного передаваемого вектора  $\mathbf{x}$  вычислительно сложен, т.к. требует поиска среди  $m^k$  входов, где  $m$  – индекс модуляции и  $k$  – количество передающих антенн. ML детектор обычно используют, когда информация о канале отсутствует на передаче.

Детектор Zero-Forcing (ZF) – линейный детектор, который восстанавливает передаваемый вектор  $\mathbf{x}$  умножением приемного сигнала с матрицей  $\mathbf{G} = \mathbf{H}^{-1}$  как  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{n}$ . Заметим, что помехи от других антенн удаляются, но инверсная матрица  $\mathbf{H}$  может увеличить шумы.

Детектор минимума среднеквадратичной ошибки (Minimum-mean-square-error, MMSE) – балансирует усиление шума и помехи от других антенн, минимизируя искажения

$\mathbf{G} = \arg_{\mathbf{G}} \min E(\|\mathbf{G}\mathbf{r} - \mathbf{x}\|^2)$ ,  $\mathbf{G} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + (1/\rho)\mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H$ . Это предотвращает усиление шумов для малых  $\rho$ , и аналогичен ZF детектору для больших значений  $\rho$ .

Анализ помехоустойчивости системы передачи на основе MIMO с учетом пространственной корреляции был проведен посредством имитационного моделирования в среде Matlab. Исходными параметрами модели были:

- входная последовательность  $N = 10000000$  бит (равновероятная последовательность “0” и “1”);
- модуляция ФМ-4;
- ПВК по алгоритму Аламоути;
- 2 передающие антенны, 1 приемная антенна;
- канал с общими релейскими замираниями;
- значения коэффициентов пространственной корреляции изменялись путем изменения стандартного отклонения углового спектра мощности  $\sigma$  [9] в кластерной модели MIMO канала;
- добавление АБГШ на приёмной стороне с задаваемым отношением сигнал/шум;
- детектирование по правилу максимального правдоподобия (ML детектор).

На рис. 3 показаны кривые помехоустойчивости с различными коэффициентами пространственной корреляции ( $R_1 = 0,25; R_2 = 0,5; R_3 = 0,9$ ).

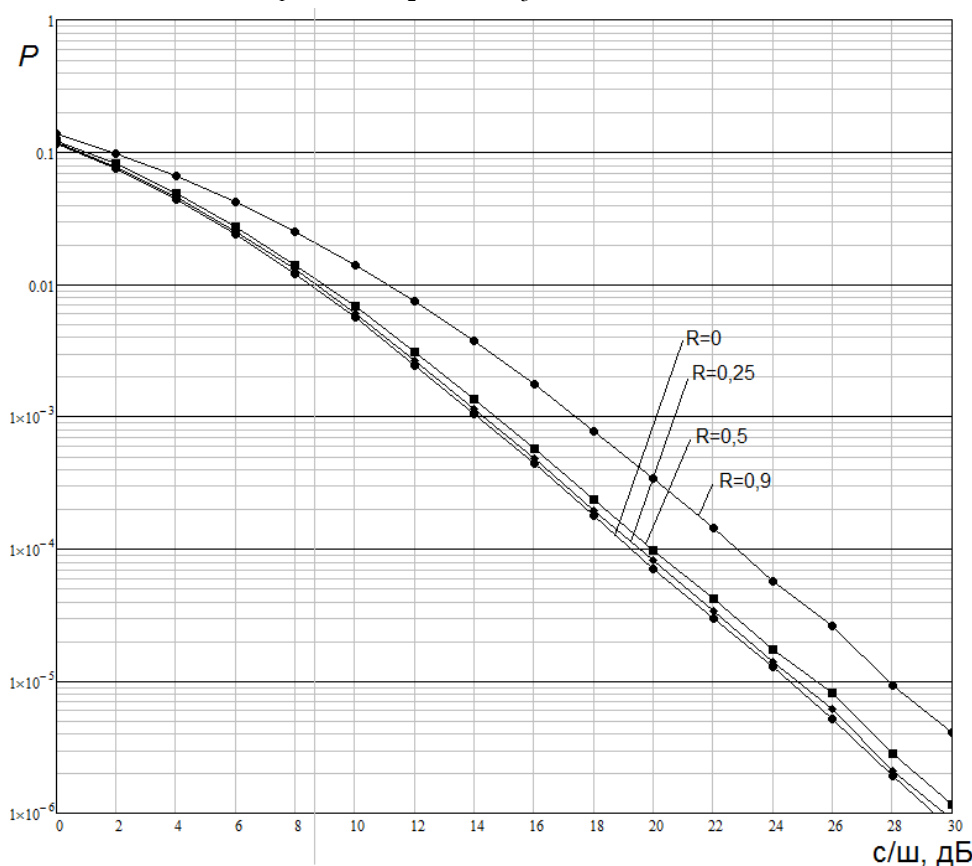


Рисунок 3 – Помехоустойчивость системы передачи с двумя передающими и одной приемной антеннами с учетом пространственной корреляции

Из рис. 3 видно, что с увеличением пространственной корреляции помехоустойчивость ухудшается. При этом можно отметить, что при значениях коэффициентов пространственной корреляции больше 0,5 разница на уровне вероятности ошибки  $10^{-5}$  составляет 1-3 дБ. Также стоит отметить, что рассматривалась пространственная корреляция только на передаче, а при использовании множества антенн и на приеме пространственная корреляция также будет оказывать влияние на помехоустойчивость системы передачи. Таким образом, пространственная корреляция может оказать значительное влияние на производительность системы передачи и ее необходимо учитывать при проектировании и исследованиях системы передачи на основе MIMO.

В заключение отметим следующее. В данной статье проведен расчет помехоустойчивости системы передачи на основе MIMO с учетом пространственной корреляции. Для этого было проведено имитационное моделирование на основе известных моделей канала, которые учитывают корреляционные свойства среды распространения. В результате моделирования получены кривые помехоустойчивости системы передачи в зависимости от различных значений коэффициентов пространственной корреляции. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для обеспечения высокой производительности системы передачи с MIMO необходимо, чтобы пространственная корреляция была мала. В последующих работах будет проведено исследование системы передачи на основе MIMO канала с различными ортогональными пространственно-временными блочными кодами.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Foschini G.J. On limits of wireless communications in a fading environment using multiple antennas / G.J. Foschini, M.J. Gans // *Wireless Personal Communications*. – 1998. – Vol. 6. – № 3. – P. 311-355.
- 2 Jankiraman M. *Scape-Time Codes and MIMO systems* / M. Jankiraman.– Artech house, inc., 2004. – 343 p.
- 3 Vucetic B. *Space-Time Coding* / B. Vucetic, J. Yuan. – John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 328 p.
- 4 Shu F. A General stochastic Spatial MIMO Channel Model for Evaluating Various MIMO Techniques / F. Shu, L. Lihua, Z. Ping // *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2007. – Vol. 3. – № 3. – P. 152–156.
- 5 Saeed M.A. Impact of the Angular Spread and Antenna Spacing on the Capacity of Correlated MIMO Fading Channels / M.A. Saeed, B.M. Ali, S. Khatun, Ismail M. // *The International Arab Journal of Information Technology*. – January, 2009. – Vol. 6, № 1. – P. 60–66.
- 6 Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels / E. Telatar // *European Transactions on Telecommunications*. – 1999. – Vol. 10, № 6. – P. 585-595.
- 7 *Multiantenna Systems for MIMO Communications* / [F. Flaviis, L. Jofre, J. Romen, A. Grau]. – Morgan & Claypool, 2008. – 267 p.
- 8 *Space-Time Wireless Systems. From array processing to MIMO Communications* / [Edited by H. Bölcskei, D. Gesbert, C.B. Papadias, A.-J. Van der Veen].– Cambridge University Press, 2006. – 645 p.
- 9 Балута М.Ю. Анализ коэффициентов пространственной корреляции в зависимости от условий работы MIMO канала // Балута М.Ю., Иващенко П.В. / *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова* – 2013. – № 1. – С. 124–129