

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 $\mathbf{h} = [h_1, h_2]$.

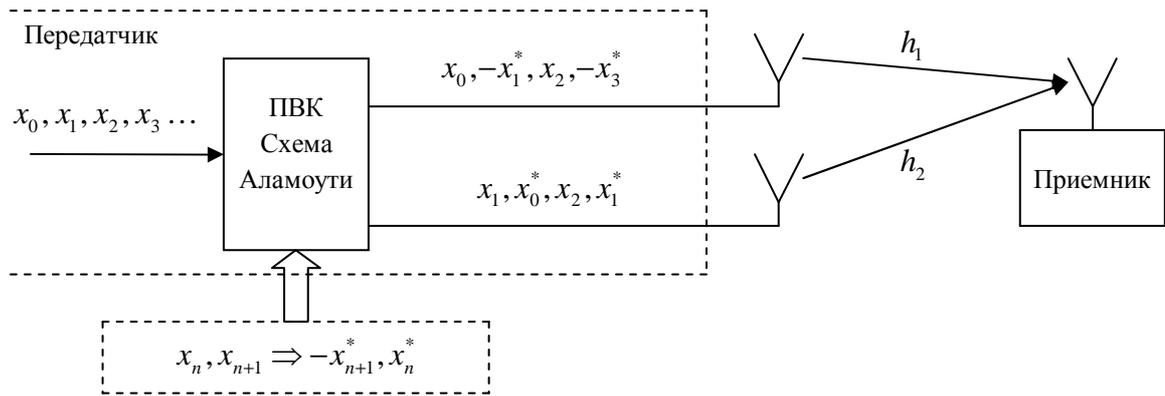


Рисунок 1 – Схема разнесенной передачи с ПВК

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.

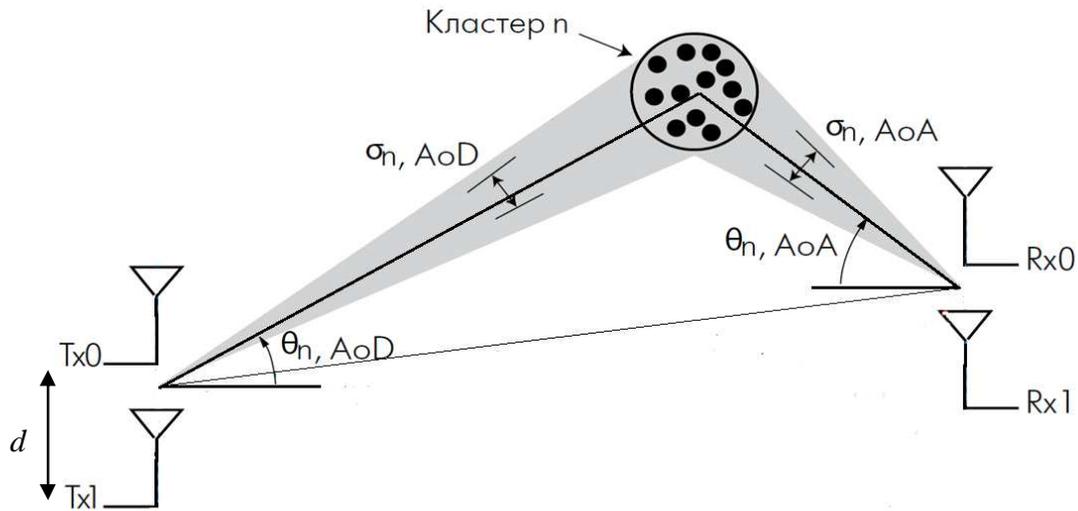


Рисунок 2 – Кластерная модель MIMO канала

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 β – коэффициент нормировки плотности вероятности; σ – стандартное отклонение углового спектра мощности; θ – 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 ρ , и аналогичен ZF детектору для больших значений ρ .

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 σ [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 ($R_1 = 0,25; R_2 = 0,5; R_3 = 0,9$).

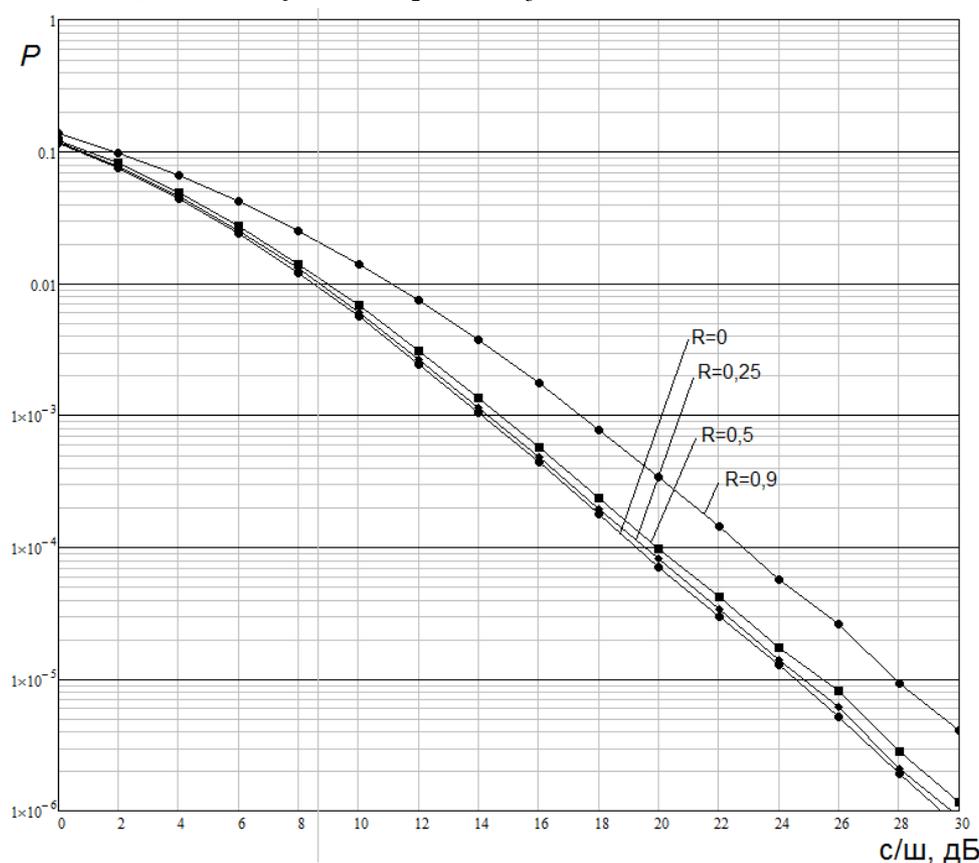


Рисунок 3 – Помехоустойчивость системы передачи с двумя передающими и одной приемной антеннами с учетом пространственной корреляции

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 МІМО 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 МІМО необходимо, чтобы пространственная корреляция была мала. В последующих работах будет проведено исследование системы передачи на основе МІМО 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 МІМО канала // Балута М.Ю., Иващенко П.В. / *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова* – 2013. – № 1. – С. 124–129