

# Исследование эффективности методов детектирования сигналов на основе аналитических моделей радиоканалов ММО

Н. С. Щелкунов

Рассматривается задача исследования эффективности детектирования сигналов на основе моделей реальных каналов ММО, построенных по результатам измерений каналов и отображающих реальные условия распространения. Наличие пространственной корреляции в канале ММО снижает пропускную способность и влияет на характеристики детектирования. Для выбранной конфигурации приемных и передающих антенн определена матрица пространственной корреляции и показаны зависимости вероятности ошибки при двух методах детектирования – ZF и MMSE.

*Ключевые слова:* радиоканал ММО, экспериментальное исследование радиоканала ММО, пространственная структура радиоканала, пространственная корреляция, аналитические модели радиоканалов ММО.

## 1. Введение

Технология ММО, при которой передатчик и приемник оборудованы несколькими антеннами, потенциально позволяет повысить спектральную эффективность реальных систем связи. Одним из приложений технологии ММО является пространственное мультиплексирование, в котором каждая передающая антенна излучает независимый поток сигналов с равномерным распределением мощности между антеннами без расширения спектра частот сигналов [1]. Для возможности разделения и детектирования пространственных потоков в приемнике требуется низкая корреляция между пространственными каналами. Первоначальные исследования, посвященные различным алгоритмам и методам приема в системах пространственного мультиплексирования, выполнялись с предположением о независимости пространственных каналов и наличии релейских замираний. В реальных условиях распространения замирания между различными парами приемных и передающих антенн коррелированы.

Для аналитического исследования различных алгоритмов формирования и приема сигналов в системах ММО разрабатываются модели каналов связи, достаточно точно отображающие свойства реальных каналов. Для определения параметров таких моделей используются данные измерений реальных каналов. В работе выполняется исследование свойств детектирования сигналов с использованием таких моделей.

## 2. Постановка задачи

При экспериментальном исследовании параметров систем связи ММО основным критерием оценки является величина пропускной способности данного канала связи. Но величина пропускной способности является предельной величиной. С точки зрения практического использования канала связи следует рассмотреть не только величину пропускной способности,

но и величину средней вероятности ошибки при различных способах формирования и приема сигналов и условиях распространения.

Целью работы является исследование методов детектирования сигналов пространственного мультиплексирования на моделях каналов ММО, отображающих реальные условия распространения и построенных по результатам измерений каналов.

### 3. Теория

Система связи ММО, состоящая из  $M_T$  передающих антенн и  $M_R$  приемных антенн, при частотно неселективных замираниях описывается выражением:

$$y = Hx + n, \quad (1)$$

где  $H$  – матрица канала размером  $M_T \times M_R$ , состоящая из комплексных коэффициентов передачи между антеннами системы,  $x$  – вектор передаваемых символов размером  $M_T$ ,  $n$  – вектор отсчетов шума с нормальным распределением размером  $M_R$  [1–2].

Так как при пространственном мультиплексировании одновременно передается несколько потоков символов, приемник должен выполнить разделение каждого потока из принятого сигнала на каждую из приемных антенн. Для этого применяются различные алгоритмы демупльтиплексирования, при которых принятая смесь сигналов обрабатывается и вычисляется оценка символов каждого переданного потока. Максимальное количество независимых потоков данных, которые могут быть переданы по системе пространственного мультиплексирования, составляет  $N_{SM} = \min\{M_T, M_R\}$ . Общая величина удельной пропускной способности системы составляет [5]:

$$C_{SM} = \sum_{i=1}^r \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{M_t} \lambda_i \right), \quad (2)$$

где  $\rho$  – отношение сигнал/шум,  $\lambda_i$  – собственное значение эрмитовой матрицы  $HH^H$ ,  $r$  – ранг матрицы  $HH^H$ .

Основными методами детектирования сигналов в системах ММО являются алгоритмы ZF и MMSE. Кроме помех, в канале связи в каждом принимаемом потоке присутствуют  $M_{T-1}$  сигналов от других антенн, которые являются сигналами интерференции, и алгоритм детектирования должен исключить влияние этих сигналов на текущий принимаемый поток.

Детектор ZF (zero forcing – обнуление, приведение к нулю сигналов интерференции) определяет оценку вектора переданных символов  $\hat{x}$  как решение задачи наименьших квадратов:

$$\hat{X}_{ZF} = \min \|y - Hx\|^2. \quad (3)$$

Решение находится как  $\hat{X}_{ZF} = (H^T H)^{-1} H^T y$ . Детектор ZF подавляет интерференцию от  $M_{T-1}$  сигналов от других антенн, но при слабой обусловленности матрицы канала  $\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \geq 1$  детектор ZF, кроме снижения интерференции от других сигналов, может увеличивать уровень шума по пространственным каналам с малыми величинами сингулярных значений  $\lambda_i$ .

Для снижения эффекта усиления шума используется детектирование с оценкой символов по критерию минимума среднеквадратической ошибки (MMSE). Детектор MMSE учитывает уровень шума в канале и позволяет получить лучшее качество детектирования. Детектор MMSE определяет оценку вектора переданных символов в виде:

$$\hat{X}_{MMSE} = (H^T H + \sigma^2 I)^{-1} H^T y. \quad (4)$$

При детектировании вычисляется дисперсия шума и отсутствует эффект усиления шума при подавлении интерференции от других пространственных потоков. Необходимость оценивания дисперсии шума повышает вычислительную сложность алгоритма, но при этом достигается улучшение параметров детектирования.

#### 4. Описание эксперимента

Измерения проводились в лабораторных условиях внутри помещения. Центральная частота излучаемого радиосигнала – 2.3 ГГц, ширина полосы частот сигнала – 100 МГц.

Зондирующая последовательность Касами длительностью 16383 отсчета предварительно фильтровалась цифровым фильтром для получения спектра с меньшими внеполосными составляющими. Далее она использовалась в векторном генераторе сигналов для формирования зондирующего радиосигнала. На приемной стороне сигнал обрабатывался анализатором спектра и сигналов.

Полученное множество реализаций принятого сигнала далее обрабатывалось на ПК, посылки тестовых сигналов выравнивались по начальным отсчетам для дальнейшей обработки. Для каждой комбинации антенн было получено 300 реализаций импульсных характеристик. По полученным реализациям импульсных характеристик канала определены параметры моделей. Для модели Кронекера это корреляционные матрицы на передающей и приемной сторонах, для модели Вайхсельбергера – матрицы собственных векторов на передающей и приемной сторонах, по которым вычислена матрица связности  $\tilde{\Omega}$ . Для модели с аппроксимацией в виде суммы произведений Кронекера вычислялись оптимальные значения матриц  $T_n$  и  $X_n$  до величины пятого порядка. Оценка полной корреляционной матрицы, отдельные корреляционные матрицы на передающей и приемной сторонах были вычислены по множеству из 300 измеренных матриц канала  $H_n$  по выражениям:

$$\hat{R}_H = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{vec}(H_n) \text{vec}(H_n)^H, \quad (5)$$

$$\hat{R}_r = \frac{1}{NM_R} \sum_{n=1}^N (H_n^H H_n)^T, \quad (6)$$

$$\hat{R}_t = \frac{1}{NM_T} \sum_{n=1}^N (H_n H_n^T). \quad (7)$$

При численном моделировании алгоритмов детектирования использовались широко применяемые модели Кронекера и Вайхсельбергера, а также модель канала связи ММО на основе оптимальной аппроксимации полной корреляционной матрицы канала суммой произведений Кронекера. Реализации канала связи при оптимальной аппроксимации вычислялись в виде:

$$H_{\text{app}} = (\sum_{n=1}^N T_n \otimes X_n)^{1/2} H_w. \quad (8)$$

Реализации канала по модели Кронекера получены в виде [3]:

$$H_{\text{крон}} = R_{\text{TX}}^{1/2} H_w R_{\text{RX}}^{1/2}, \quad (9)$$

где  $R_{\text{TX}}^{1/2}$  и  $R_{\text{RX}}^{1/2}$  – квадратный корень из корреляционных матриц на передающей и приемной сторонах,  $H_w$  – матрица из элементов с комплексным нормальным распределением.

Модель Вайхсельбергера вычисляет реализации матриц канала ММО в виде [3]:

$$H_{\text{weich}} = U_{\text{RX}}(\hat{\Omega} \cdot H_w)U_{\text{TX}}. \quad (10)$$

Соответствующие параметры моделей определялись на основе данных, полученных при проведении измерений радиоканалов.

Для исследования влияния пространственной корреляции канала на вероятность ошибки детектирования проводилось имитационное моделирование алгоритмов детектирования на моделях каналов с наличием и отсутствием пространственной корреляции.

Конфигурация системы ММО:  $M_T = M_R = 4$ , на вход канала связи подавался поток из модулированных символов QPSK и передавался каждой из антенн с одинаковым уровнем мощности. На приемной стороне выполнялось детектирование по методам ZF и MMSE. Предполагается, что канал  $H$  оценивается точно. Результаты моделирования показаны на рис. 1 в виде зависимости средней вероятности ошибки по всем пространственным каналам от отношения сигнал/шум для канала с отсутствием пространственной корреляции и при ее наличии.

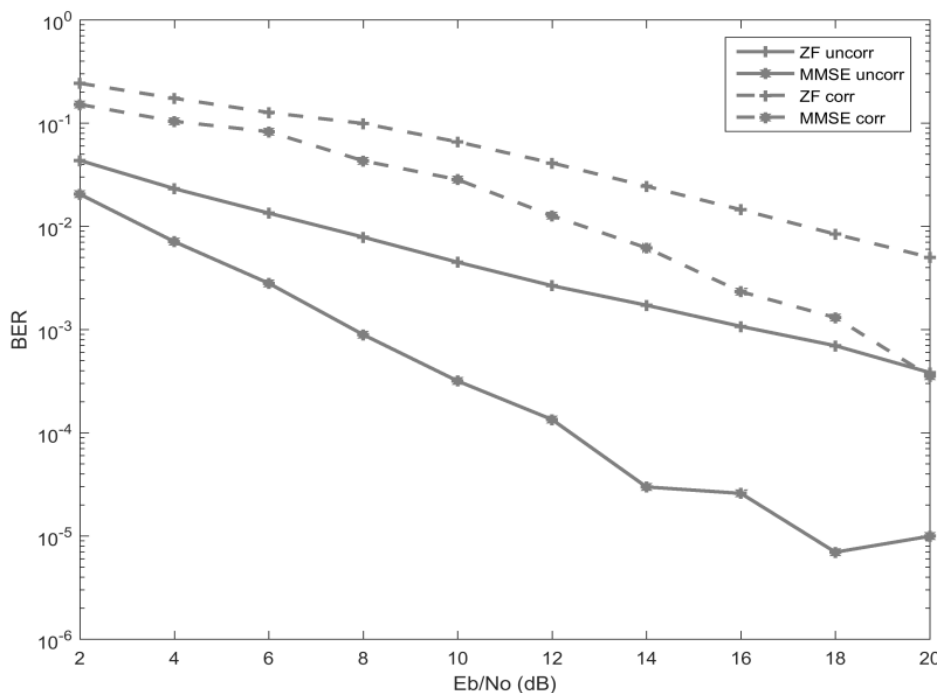


Рис. 1. Вероятность ошибки детектирования методами ZF и MMSE для модели канала с наличием и отсутствием корреляции

Коррелированный канал моделировался с использованием параметров, полученных из измерений реального коррелированного канала. Детектирование по алгоритму MIMO-MMSE обеспечивает меньшую вероятность ошибки по сравнению с MIMO-ZF, что объясняется более точным измерением канала. В канале с пространственной корреляцией при вероятности ошибки  $p = 10^{-2}$  детектор MMSE обладает выигрышем в отношении сигнал/шум порядка 3 дБ. При отсутствии корреляции выигрыш увеличивается. Наличие пространственной корреляции значительно влияет на вероятность ошибки детектирования, затрудняя детекторам разделение пространственных потоков. Основным методом повышения помехоустойчивости и скорости передачи по каналам с пространственной корреляцией состоит в применении обратной связи к передатчику и использовании различных алгоритмов предкодирования. При этом возможно значительное повышение спектральной и энергетической эффективности.

## 5. Заключение

Эффективность алгоритмов детектирования ZF и MMSE зависит от свойств канала MIMO. Экспериментальные исследования канала MIMO позволяют получить реальные данные для определения параметров моделей каналов. Построенная модель канала связи MIMO позволяет исследовать помехоустойчивость методов обработки сигналов и предкодирования. Для конкретных условий распространения, по которым построены аналитические модели, получена зависимость вероятности ошибки детектирования.

## Литература

1. *Almers P., Bonek E., Burr A. et al.* Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems // EURASIP J. Wireless Commun. Netw. 2007.
2. *Chiani M., Win M. Z., and Zanella A.* On the capacity of spatially correlated MIMO Rayleigh-fading channels // IEEE Trans. Inf. Theory. 2003. V. 49, № 10. P. 2363–2371.
3. *Costa N., Haykin S.* Multiple-input multiple-output channel models: theory and practice. John Wiley & Sons Ltd, 2010. 225 p.
4. *Molisch A.* Wireless Communications. Wiley – IEEE, 2011. 844 p.
5. *Paulura A. J., Gore D. A., Nabar R. U., Bolcskei H.* An Overview of MIMO Communications – A Key to Gigabit Wireless // Proceedings of the IEEE. Feb. 2004. V. 92, № 2. P. 198–218.
6. *Artes H., Seethaler D., and Hlawatsch F.* Efficient detection algorithms for MIMO channels: a geometrical approach to approximate ML detection // IEEE Trans. Signal Process. Nov. 2003. V. 51, № 11. P. 2808–2820.
7. *Louie R. H. Y., McKay M. R., and Collings I. B.* Impact of correlation on the capacity of multiple access and broadcast channels with MIMOMRC // IEEE Trans. Wireless Commun. June 2008. V. 7, № 6. P. 2397–2407.

*Статья поступила в редакцию 12.09.2018;  
переработанный вариант – 08.11.2018.*

### **Щелкунов Николай Сергеевич**

аспирант кафедры радиотехнических систем СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 2-698-346, e-mail: shns@ngs.ru.  
Область научных интересов: телекоммуникационные системы.

### **Investigation of the effectiveness of signal detection methods based on analytical models of MIMO radio channels**

**N. S. Shchelkunov**

The task of studying the efficiency of signal detection based on the models of real MIMO channels, constructed on the results of channel measurements and displaying the actual distribution conditions is considered.

*Keywords:* radio channel MIMO, experimental measurement of MIMO radio channel, spatial structure of the radio channel, spatial correlation, analytical models of MIMO radio channels.