

УДК 621.396

Исследование алгоритмов многопользовательского детектирования В MIMO – системах

*Шабанов Д.В., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»*

*Научный руководитель: Ахияров В.В., к.т.н.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства»
main@rl1-11.bmstu.ru*

Многопользовательское детектирование (МПД, multiuser detection) — это метод приема полезных сигналов, при использовании которого все мешающие сигналы от других абонентов воспринимаются и обрабатываются не как шум, а как сигнал, прошедший через многолучевой канал [1].

Основные принципы, а также сам термин "многопользовательское детектирование" появились в 80-е годы, данная технология активно исследовалась применительно к CDMA (Code Division Multiple Access) [2], в дальнейшем технология МПД стала использоваться в системах с OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Метод МПД является универсальным по отношению к схеме модуляции, поэтому его можно интегрировать в систему на уровне обработки сигналов без модификаций на физическом и канальном уровнях. Характерной особенностью современных систем связи является применение ортогональных сигналов, в данной работе рассматривается более общий случай использования алгоритмов МПД для обработки неортогональных сигналов.

В системах MIMO (multiple-input and multiple-output) идея многопользовательского детектирования реализована изначально, поскольку «множественным пользователем» в них являются наборы антенн на приёмной и передающей стороне. Система MIMO позволяет использовать пространственное мультиплексирование, когда каждая антенна передаёт независимый поток информации, и таким образом увеличить пропускную способность канала связи. Помимо этого, пространственное мультиплексирование можно рассматривать как один из способов борьбы с рэлеевскими замираниями. Такая

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/616058.html>

возможность представляет большой практический интерес, поэтому пространственное мультиплексирование было включено в стандарты WiFi, WiMAX и 4G LTE. Алгоритмы МПД в таких системах позволяют осуществлять детектирование с учетом многолучевого распространения сигнала и наличия аддитивного шума.

Существуют различные алгоритмы [3], отличающиеся по качеству детектирования и скорости вычислений. В данной работе были исследованы следующие алгоритмы МПД:

- 1) обращения канальной матрицы H (ОКМ) - самый простой алгоритм;
- 2) максимального правдоподобия (МП) – является эталоном, к которому стремятся другие алгоритмы;
- 3) Минимума среднеквадратичного отклонения (МСКО) – хорошая скорость обработки и качество детектирования.

Пусть принятый базовой станцией сигнал определяется следующим образом:

$$x = H \cdot a + n,$$

где a – вектор переданного информационного сигнала размерности L , n – вектор аддитивного гауссовского шума размерности P , H – передаточная функция канала связи (матрица $P \times L$), амплитуда элементов которой распределена по закону Рэлея, а фаза – равномерно в интервале $(0, 2\pi)$, x – вектор принятого сигнала размерности P .

Оценка переданного сигнала $\hat{a}$ каждым из алгоритмов на основе принятого сигнала x осуществляется следующим образом:

- метод ОКМ:
$$\hat{a}_{оbрH} = H^{-1} \cdot x,$$

- метод МП:
$$\hat{a}_{МП} = \arg \left\{ \min_{a_i} \|x - H \cdot a_i\|^2 \right\},$$

где a_i – вектор всех возможных значений переданного сигнала размерности L . Таким образом, алгоритм перебирает все возможные комбинации для того, чтобы найти абсолютный минимум, и его вычислительная сложность экспоненциально возрастает с увеличением L ;

- метод МСКО:
$$\hat{a}_{МСКО} = W^* \cdot x,$$

где W^* – весовая матрица, индекс «*» означает эрмитово сопряжение. Для нахождения W^* нужно минимизировать СКО оценки от переданной последовательности, которая даёт следующий результат:

$$W = (H \cdot H^* + \sigma^2 \cdot I)^{-1} \cdot H,$$

где σ^2 – мощность гауссовского шума, I – единичная матрица.

С использованием средств GUI (Graphical User Interface) среды MATLAB был создан интерфейс, а затем скомпилирована программа, не требующая для работы установки среды MATLAB (см. рис. 1). Для моделирования была выбрана система MIMO с L передающими антеннами (Tx, transmitter), P приёмными антеннами (Rx, receiver), схемы модуляции – BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256, замирания в канал считались рэлеевскими, шум – гауссовым, а суммарная излучаемая энергия – постоянной. В программе пользователь выбирает схему модуляции, количество передающих и приемных антенн, а также алгоритм детектирования. После расчётов полученные графики отображаются в окне программы.

В результате моделирования были получены зависимости BER (Bit Error Rate, вероятность ошибки на бит) от E_b/N_0 (отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума), каждая точка графика является усреднением по 2000-2500 реализациям сгенерированной случайной информационной последовательности длиной 100 бит, прошедшей многолучевой канал (метод Монте-Карло).

На рис. 1 ... рис. 3 приведены зависимости $BER=f(E_b/N_0)$ для трех исследуемых алгоритмов в случае наращивания системы: одна антенна на передачу и одна на приём -> MIMO 2x2 -> MIMO 3x3 -> MIMO 4x4. На рис. 1 показано окно пользовательского интерфейса и результаты расчетов для метода ОКМ. Видно, что при увеличении числа антенн BER увеличивается по сравнению со случаем использования одной антенны на передачу и одной на прием (зеленая кривая – теоретический расчет для рэлеевского канала). При использовании метода ОКМ представленная тенденция одинакова для разных схем модуляции. Однако необходимо учитывать, что спектральная эффективность при этом растёт, т.к. несколькими антеннами передаётся больше информации в единицу времени.

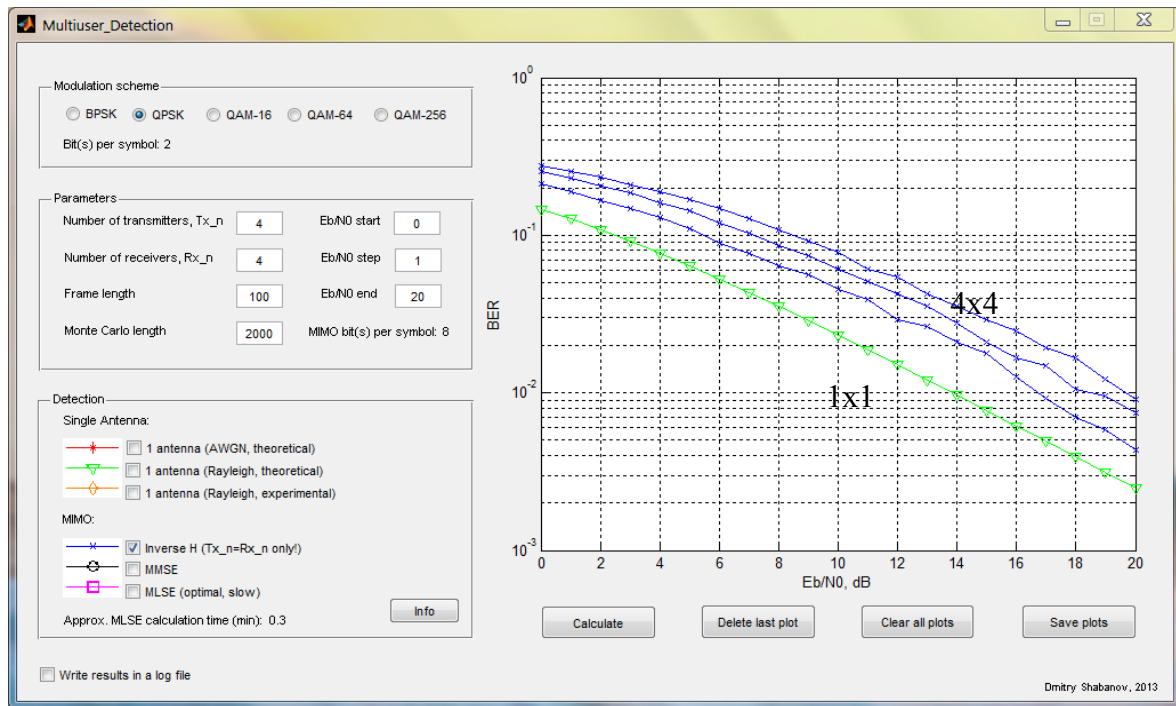


Рис. 1. Окно пользовательского интерфейса с результатами расчетов методом обращения канальной матрицы H , модуляция QPSK, 1x1 -> MIMO 2x2 -> MIMO 3x3 -> MIMO 4x4

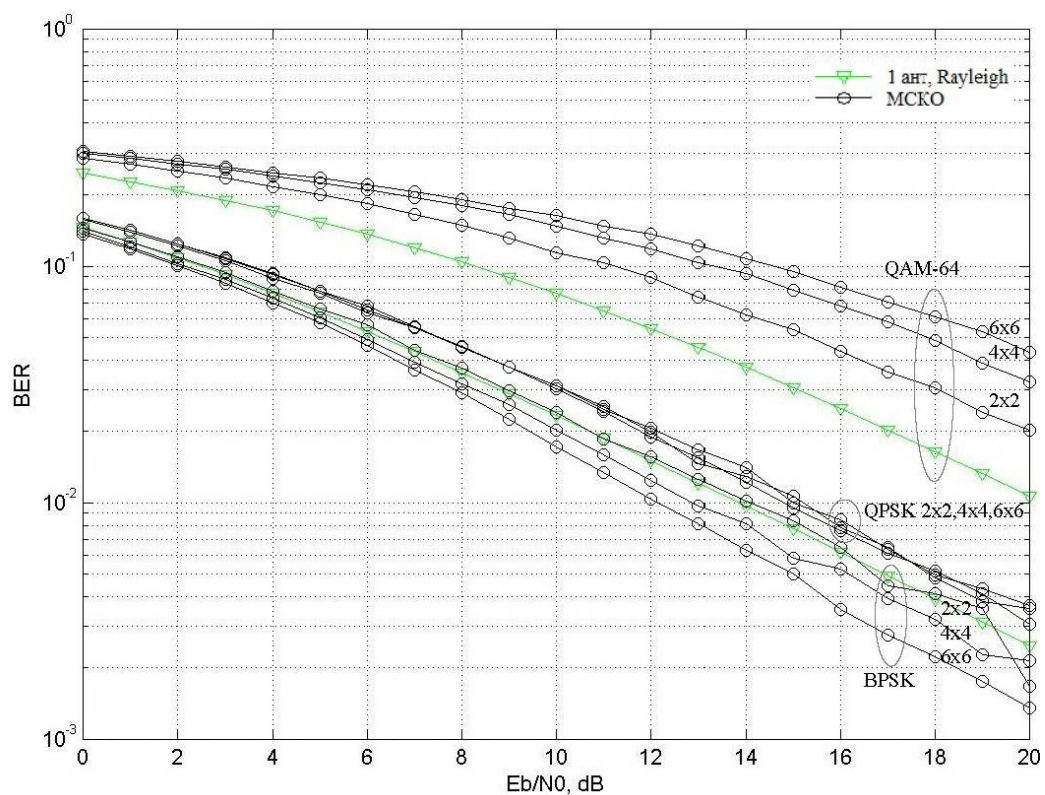


Рис. 2. Эффективность алгоритма МСКО, 1x1 -> MIMO 2x2 -> MIMO 4x4 -> MIMO 6x6

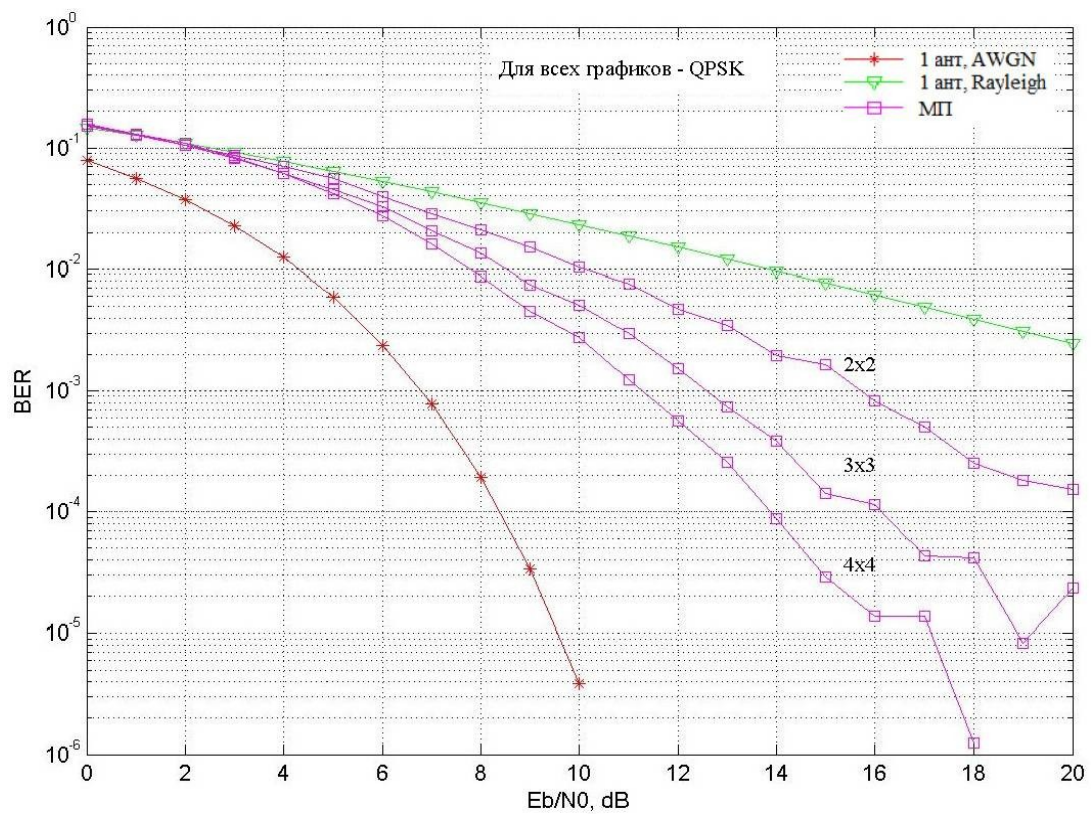


Рис. 3. Эффективность алгоритма МП,
1x1 -> МИМО 2x2 -> МИМО 3x3 -> МИМО 4x4

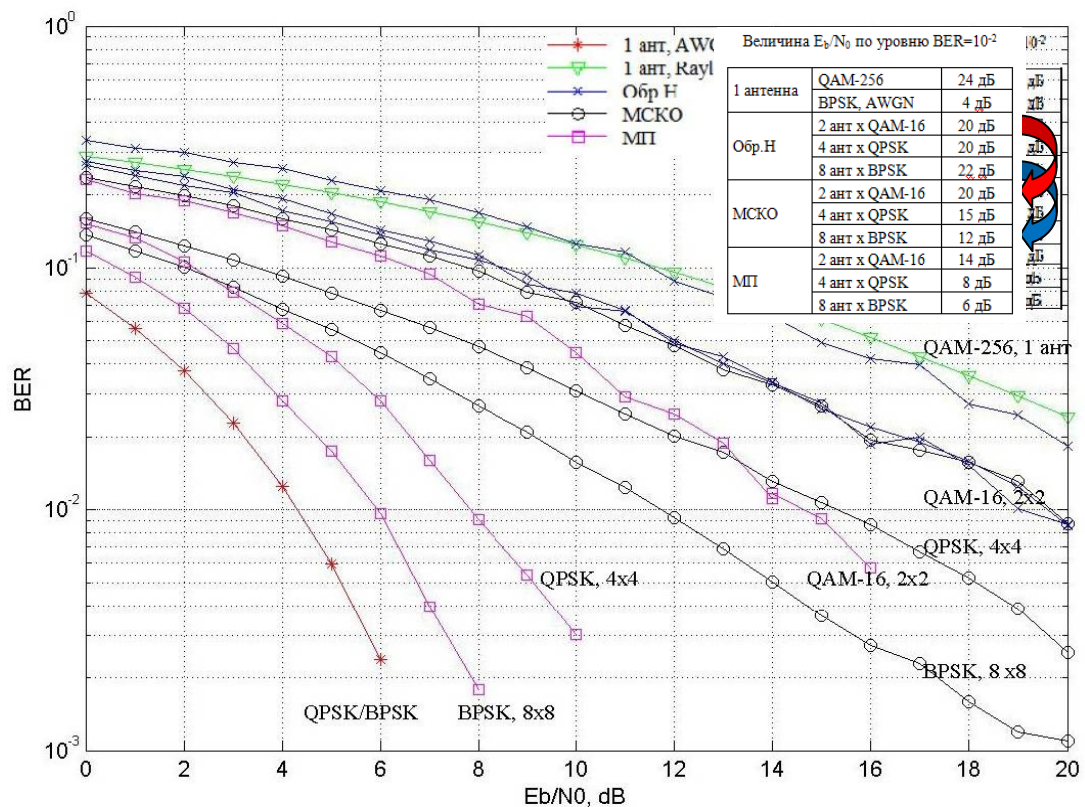


Рис. 4. Сравнение различных схем передачи при равенстве спектральной эффективности (8 бит/с/Гц)

Для алгоритма МСКО зависимость более сложная (см. рис. 2): при использовании BPSK с увеличением количества антенн BER уменьшается относительно теоретической кривой для канала с релеевскими замираниями, т.е. наблюдается выигрыш от использования алгоритмов МПД, для QPSK – остаётся постоянной, а при более сложных схемах модуляции BER увеличивается при наращивании количества антенн. Т.о. при использовании метода МСКО алгоритмы МПД наиболее эффективны для простых схем модуляции. Оптимальный алгоритм МП демонстрирует наилучшие результаты (см. рис. 3), при его использовании BER уменьшается с ростом количества антенн.

Наибольший интерес представляет сравнение результатов при равенстве спектральных эффективностей, что соответствует постоянной суммарной мощности, излученной всеми антеннами, в одной и той же полосе частот: графики, представленные на рис. 4 (за исключением кривой для модуляции BPSK в канале с гауссовым шумом), получены при одинаковой спектральной эффективности в 8 бит/с/Гц.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что для фиксированной конфигурации (схема модуляции + количество антенн) МП обеспечивает лучшее качество детектирования, чем МСКО, а МСКО лучше, чем ОКМ. Сравнивая значения E_b/N_0 , соответствующие $BER=10^{-2}$, можно отметить, что выигрыш МСКО по сравнению с ОКМ колеблется от 0 дБ для ММО 2x2 (красная стрелка на рис. 4) до 10 дБ для ММО 8x8 (синяя стрелка на рис.4), а МП лучше МСКО на 6-7 дБ. В случае ММО 8x8 и модуляции BPSK алгоритм МП приближается к кривой, соответствующей модуляции BPSK в канале с гауссовым шумом при использовании одной антенны на передачу и одной на прием (отличие ~ 2 дБ), т.е. МПД позволяет практически полностью компенсировать релеевские замирания.

Представленные результаты статистического моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- * для борьбы с релеевскими замираниями использование алгоритмов МПД эффективно, при этом наибольший выигрыш достигается при увеличении числа антенн и использовании простых схем модуляции;
- * рассмотренные алгоритмы позволяют найти компромисс между временем вычислений и качеством детектирования;
- * использование неортогональных, пространственно разнесенных сигналов позволяет наращивать пропускную способность системы передачи данных.

В работе [4] было показано, что в реальных условиях алгоритмы МПД оказываются эффективными только при достаточно большом числе лучей (5-15) и при сравнительно малых дальностях связи, характерных для плотной городской застройки. В книге [2] Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

рассматривается возможность использования существующих алгоритмов для других моделей каналов и модификации алгоритмов, обусловленные наличием ограниченной информации о канале. Проблемы, возникающие при реализации МПД на практике, заключаются в измерении характеристик канала и распределении вычислительных ресурсов между декодированием и детектированием. В заключение следует отметить, что тематика МПД активно развивается, поэтому исследования в данной области продолжаются [5,6].

Список литературы

1. CDMA: многопользовательское детектирование. — 2002 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.osp.ru/nets/2000/08/141303/> (дата обращения: 06.05.2013).
2. M.Honig. Advances in MUD. USA, New Jersey, Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2009. 493с.
3. G.Xue, J.Weng, T.Le-Ngoc, S.Tahar. Multiuser Detection Techniques: An Overview. Department of Electrical and Computer Engineering, Concordia University, 1998. 20с.
4. И.А.Мухин, М.С.Немировский. Анализ условий эффективного функционирования многоантенных систем передачи информации с пространственным мультиплексированием. «Радиотехника», №10, 2011. 8с.
5. M. Jiang, L. Hanzo. Multiuser MIMO-OFDM for Next-Generation Wireless Systems. Proceedings of the IEEE | Vol.95, No.7, July2007. 40с.
6. H.Dai, A.Molisch. Multiuser Detection for Interference-Limited MIMO Systems. AT&T Labs – Research, 2002. 5с.