

УДК 621.396.2

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МІМО И МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО КОДИРОВАНИЯ

ПАНЬКОВА В. В., САЛОМАТИН С. Б., ФАМ Х. А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*E-mail: pankova@bsuir.by, salomatin@bsuir.by, huyanhpham96@gmail.com*

**Аннотация.** В мобильных системах связи широко используется технология МІМО, которая основывается на применении нескольких антенн на передающей и приемной сторонах. В работе приведены преимущества технологии МІМО – увеличение пропускной способности и уменьшение вероятности ошибок при многолучевом распространении. Рассмотрены алгоритмы демодуляции пространственно-временных кодов.

**Abstract.** In mobile communication systems, MIMO technology is widely used, which is based on using multiple antennas at the transmitting and receiving sides. The advantages of MIMO technology - increasing the capacity and reducing the likelihood of errors in multipath propagation. Algorithms for demodulation of space-time codes are considered.

### Введение

Современные системы радиосвязи имеют высокие показатели пропускной способности. Резкий скачок классической границы Шеннона для пропускной способности систем связи стал возможен благодаря пространственной обработке сигналов, т.е. технологии МІМО, использующей эффект передачи радиоволн, называемый многолучевым распространением, при котором передаваемые сигналы отражаются от множества объектов и препятствий, а принимающая антенна воспринимает сигналы под разными углами и в разное время. Применение этой технологии позволяет за счет разнесения сигнала на передаче и приеме уменьшить относительное число бит, принятых с ошибкой, повышая тем самым помехоустойчивость каналов связи.

### Цель работы

Анализ алгоритмов повышения пропускной способности сети за счет применения методов адаптивной пространственной обработки сигналов и поиск баланса между повышением пропускной способности технологии МІМО и уменьшением вероятности ошибки на приеме

Предполагается, что увеличение числа независимых радиоканалов приводит к снижению энергии на бит передаваемого сообщения и, как следствие, к повышению вероятности ошибки на бит принимаемого сообщения.

### Методика исследования

Предполагается, что сигналы на передающей стороне излучаются одновременно и в одной полосе частот через  $M$  передающих антенн, а приемник имеет идеальное знание о канале. Информация о параметрах канала передается напрямую в устройство декодирования Аламоути, которое извлекает и интерполирует их для получения оценки канала для каждого передаваемого полезного символа. При моделировании бинарный генератор Бернулли создает случайный двоичный сигнал (вероятность выпадения 1 равна 0.5), который в дальнейшем модулируется различными способами: бинарная фазовая манипуляция (BPSK), квадратурная фазовая манипуляция (QPSK), 16-квадратурная амплитудная модуляция (16-QAM). Затем кодируется кодером Аламоути для передачи по каналу МІМО с релейскими замираниями и аддитивным белым шумом. Декодер Аламоути объединяет сигналы от приемных антенн в единый поток для демодуляции. Блок вычисления ошибок сравнивает демодулированные данные с входными.

### Результаты моделирования

При моделировании систем связи (SISO – одна передающая антенна, одна приемная антенна; SIMO – одна передающая антенна, две приемные антенны; MISO – две передающие антенны, одна приемная антенна; MIMO 2×2 – две передающие антенны, две приемные антенны; MIMO 4×4 – четыре передающие антенны, четыре приемные антенны) все исходные параметры, такие как частота дискретизации, методы модуляции, скорость передачи и др., выбраны в полном соответствии со стандартом системы радиосвязи IEEE 802.16e. Результаты исследования отражены на графиках.

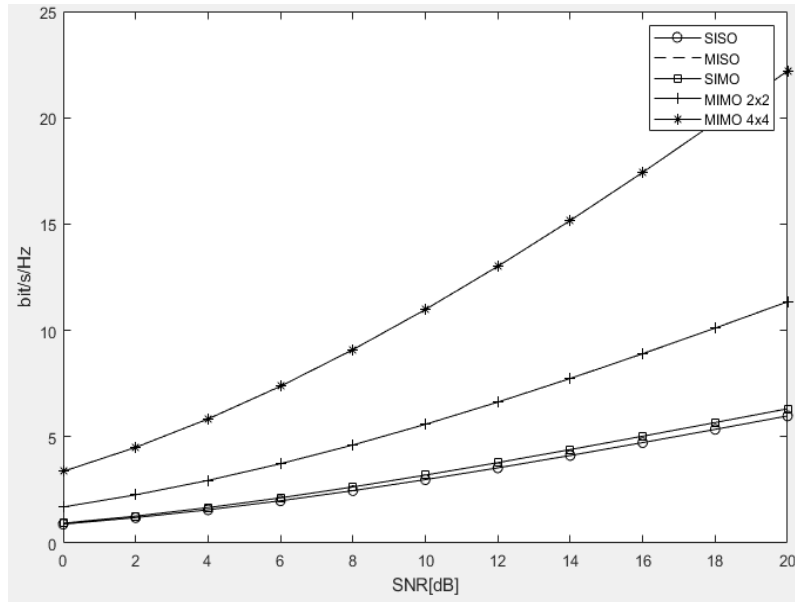


Рис. 1. Зависимость пропускной способности систем от отношения сигнал/шум

Видно, что в беспроводных системах связи скорость передачи информации заметно возрастает только с увеличением количества передающих и приемных антенн.

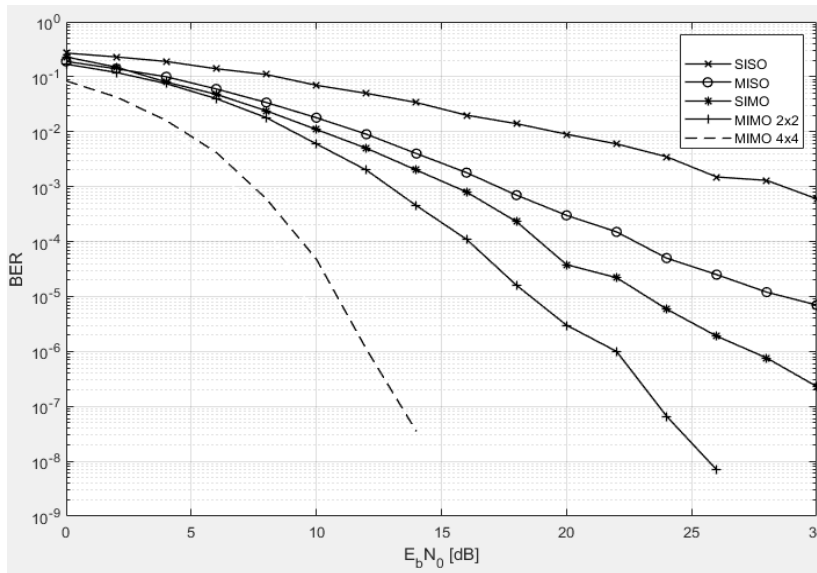
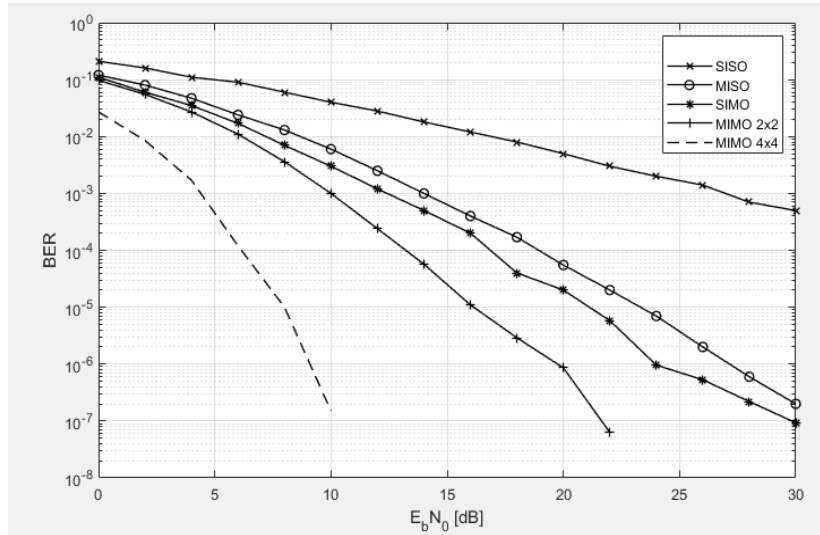


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум для разных вариантов разнесения на приеме и передаче при модуляции QPSK

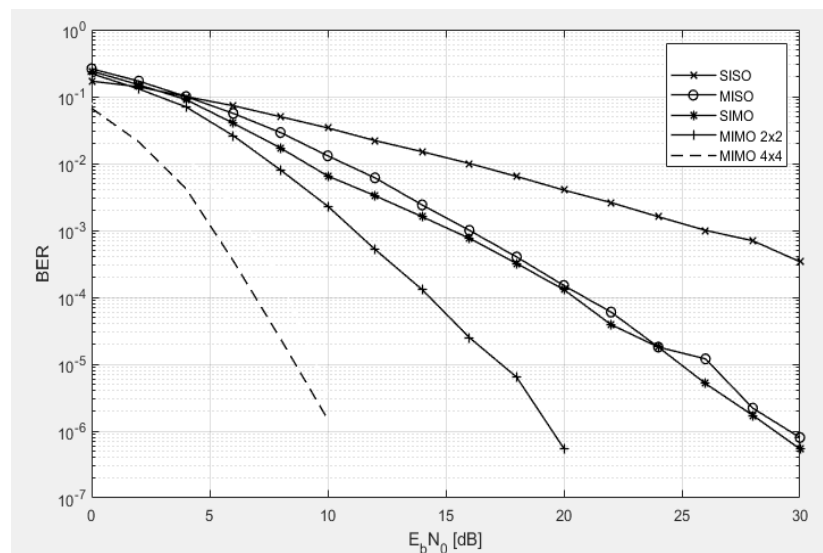
Для вероятности ошибки  $10^{-4}$  выигрыш в помехоустойчивости на 3 дБ имеют система SIMO над MISO, система MIMO 2×2 над SIMO. При той же вероятности ошибки выигрыш в помехоустойчивости системы MIMO 4×4 над системой MIMO 2×2 увеличивается в 2 раза и составляет 6,5 дБ. Сравнение характеристик для вариантов с одной передающей антенной и двумя приемными

(разнесение на приеме) и с двумя передающими антеннами и одной приемной (разнесение на передаче) показывает, что разнесение на приеме обеспечивает дополнительный выигрыш 3 дБ. Также разнесение на приеме и передаче позволяет обеспечить дополнительный выигрыш 3 дБ по сравнению с разнесением на приеме, т.е. с увеличением количества антенн на передаче и на приеме улучшается помехоустойчивость.



**Рис. 3.** Зависимость вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум для разных вариантов разнесения на приеме и передаче при модуляции BPSK

Модуляция BPSK позволяет улучшить помехоустойчивость. Для вероятности ошибки  $10^{-4}$  система SIMO выигрывает по помехоустойчивости у системы MISO 3,2 дБ; система MIMO 2x2 выигрывает у SIMO 3,3 дБ; система MIMO 4x4 выигрывает у MIMO 2x2 7 дБ. Здесь также разнесение на приеме обеспечивает дополнительный выигрыш 3,2 дБ, разнесение на приеме и передаче – 3,3 дБ, а увеличение количества антенн на передаче и на приеме позволяет улучшить помехоустойчивость.



**Рис. 4.** Зависимость вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум для разных вариантов разнесения на приеме и передаче при модуляции 16-QAM

При той же вероятности ошибки  $10^{-4}$  система выигрывает по помехоустойчивости у системы MISO 0,3 дБ; система MIMO 2x2 выигрывает у SIMO 6,9 дБ; система MIMO 4x4 выигрывает у MIMO 2x2 7,2 дБ. Разнесение на приеме обеспечивает небольшой дополнительный выигрыш 0,3 дБ.

Очевидно, что при модуляции 16-QAM заметное увеличение помехоустойчивости возможно только при увеличении количества антенн на передаче и на приеме, т.е. в системах MIMO 2×2 и MIMO 4×4.

Алгоритмы обработки сигналов в MIMO-системах без обратной связи отличаются способом разделения переданных символов (посимвольным детектированием) в приемных антеннах. Основные из них: метод сведения к нулю (Zero Forcing (ZF)); оценка по минимуму среднеквадратичной ошибки (МСКО-приемник); максимально правдоподобная (МП) оценка принятых символов (МП-приемник); алгоритм BLAST (Bell Laboratories Layered Space-Time) пространственного декодирования, в частности, вертикальный BLAST (V-BLAST).

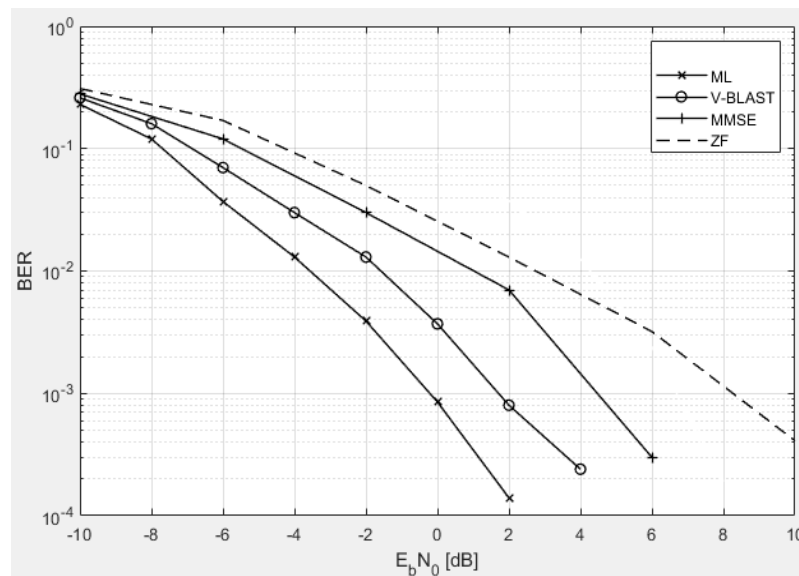


Рис. 5. Зависимость вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум при различных алгоритмах демодуляции: Zero-Forcing (ZF), МСКО (MMSE), МП (ML), V-BLAST

Для вероятности ошибки  $10^{-3}$  отношение сигнал/шум при демодуляции алгоритмом МП составляет 0 дБ; алгоритмом V-BLAST – 1,8 дБ; алгоритмом МСКО – 4,5 дБ; алгоритмом ZF – 8,2 дБ. Алгоритм МП обеспечивает наименьшее значение вероятности ошибки по сравнению с остальными, а соответственно, обладает наилучшими свойствами помехоустойчивости. Алгоритм МСКО не уступает в помехоустойчивости другим и обладает меньшей вычислительной сложностью.

### Заключение

Посредством теоретического анализа и результатов моделирования системы связи подтверждается, что пространственно-временное кодирование является эффективной техникой для уменьшения влияния замирания на сигналы, улучшения качества и пропускной способности системы связи. Улучшение отношения сигнал/шум при использовании методов разнесения составляет до десяти дБ, что показывает преимущество технологии для систем связи, которые требуют улучшения пропускной способности и качества услуги, эргодической емкости, сокращение размеров оконечных устройств. Улучшение отношения сигнал/шум эффективно при увеличении антенн от одной до двух как передающих, так и приемных. Наибольшей помехоустойчивостью обладает алгоритм МП.

### Список использованных источников

- Alamouti S. M. Space-time block coding: A simple transmitter diversity technique for wireless communications. – IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Oct. 1998, vol. 16, p.1451–1458.
- Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang – MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB, IEEE 2010.
- Arthur A. Giordano, Allen H. Levesque – Modeling of Digital Communication Systems Using SIMULINK-Wiley 2015.