

# Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.24412/2221-2574-2025-2-5-13

УДК 621.396.2

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИГНАЛОВ В РАДИОКАНАЛАХ С ЗАМИРАНИЯМИ

**Глушанков Евгений Иванович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

E-mail: [glushankov.ei@sut.ru](mailto:glushankov.ei@sut.ru)

**Елисеев Никита Константинович**

аспирант ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича».

E-mail: [eliseevnic.sci@gmail.com](mailto:eliseevnic.sci@gmail.com)

Адрес: 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1, лит. А.

**Аннотация:** В статье рассмотрены основные методы повышения эффективности радиолиний связи, представлены результаты сравнительного исследования помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций (СКК) с пространственно-временным кодированием (ПВК) для КВ радиоканалов с несколькими передающими и приёмными антеннами в условиях воздействия аддитивного белого гауссовского шума, плоских или частотно-селективных замираний. На основе полученных данных рассчитаны показатели энергетической и спектральной эффективности СКК с ПВК для радиоканалов с замираниями в сравнении с показателями для предельного случая – «границы Шеннона». Показана потенциальная возможность увеличения эффективности систем связи в условиях замираний при использовании сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией и ортогональным пространственно-временным блочным кодированием. Обозначены направления перспективного развития алгоритмов формирования и приёма сигналов для дальнейшего повышения эффективности систем связи.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, спектральная эффективность, сигнально-кодовые конструкции, пространственно-временное кодирование, моделирование, КВ канал, MIMO.

### 1. Методы повышения спектральной и энергетической эффективности

В современных системах связи возрастают требования к пропускной способности, которые могут быть выполнены за счёт повышения спектральной эффективности радиолиний. Под спектральной эффективностью понимается мера пропускной способности, приходящаяся на единицу радиочастотного спектра [1]. Спектральная эффективность может быть повышена за счёт оптимального выбора схемы модуляции сигнала, ортогонального частотного мультиплексирования, пространственно-временного кодирования (технологии многоантенных систем — MIMO) [2–8], адаптации

радиолинии к характеристикам канала связи и др. Отдельным способом повышения эффективности является оптимальное согласование методов помехоустойчивого кодирования информации и модуляции сигналов, итогом которого является формирование сигнально-кодовых конструкций (СКК).

Прямым методом повышения спектральной эффективности СКК является метод многократной фазовой модуляции (MPSK — Multiple Phase Shift Keying), который объединяет символы двоичного алфавита исходного сообщения в общем случае в блоки по  $K$  символов, переходя к каналному алфавиту объёмом  $m=2^K$ . Каждому символу нового алфавита

ставится в соответствие сигнал [1]

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + 2\pi i/m), \quad i=1, \dots, m.$$

С ростом  $m$  полоса занимаемых частот пропорционально уменьшается, что повышает спектральную эффективность [1]. Однако, увеличение основания используемого канального алфавита в случае MPSK приводит к резкому снижению энергетической эффективности. Основной причиной энергетического проигрыша является уменьшение расстояния между наиболее близко расположенными сигнальными векторами. Снижение энергетических потерь возможно путём перехода к системе сигналов, аналогичных используемым при MPSK, но имеющих различные энергии. Наряду с фазовой модуляцией в таком случае производится дополнительная амплитудная модуляция, что обеспечивает увеличение минимального расстояния между сигнальными векторами. Такой метод модуляции получил название квадратурной амплитудной модуляции (QAM – Quadrature Amplitude Modulation), т.к. ансамбль сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией  $s_i(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \psi_i)$ ,  $i=1, \dots, m$ , можно представить в виде [1]:

$$s_i(t) = a_i \cos(\omega_0 t) - b_i \sin(\omega_0 t), \quad (1)$$

$$0 \leq t \leq T_{(m)}, \quad i=1, \dots, m,$$

где

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad \psi_i = \arctg(b_i/a_i).$$

Как следует из (1), такой ансамбль можно построить путём отдельной амплитудной модуляции колебаний  $\cos(\omega_0 t)$  и  $\sin(\omega_0 t)$  низкочастотными квадратурными составляющими  $a_i = A_i \cos(\psi_i)$  и  $b_i = A_i \sin(\psi_i)$ . При этом энергетический выигрыш использования QAM в сравнении с MPSK оказывается существенным, а удельная скорость передачи информации  $\gamma$  остаётся практически неизменной, поскольку полоса занимаемых частот главным образом определяется длительностью сигнала  $T_{(m)}$ , остающейся неизменной.

Технология MIMO (Multiple Input Multiple

Output) подразумевает использование нескольких антенн на передающей и приёмной стороне, что позволяет значительно повысить пропускную способность и/или помехоустойчивость системы связи по сравнению с традиционной системой с одной передающей и одной приёмной антеннами — SISO (Single Input Single Output) [9]. Математическая модель системы MIMO рассматривается для  $N$  передающих и  $M$  приёмных антенн [2]. Предполагается, что передаваемый вектор комплексных информационных символов  $s$  имеет размерность  $N \times 1$ , при этом символ  $s_i$  передаётся через  $i$ -ю антенну. Матрица канала  $H$  является прямоугольной комплексной матрицей размерности  $M \times N$ . Компонент  $h_{ij}$  этой матрицы есть комплексный коэффициент передачи канала между  $j$ -й передающей антенной и  $i$ -й приёмной антенной. В данной модели не учитывается ослабление сигнала в канале связи, поэтому мощность сигнала в каждой приёмной антенне равна мощности  $E_s$  всего излучаемого сигнала (т. е. суммарной мощности сигналов, излучаемых всеми передающими антеннами). С учётом этого элементы матрицы канала  $H$  должны удовлетворять следующему нормировочному соотношению [2]:

$$\sum_{j=1}^N E \{ |h_{ij}|^2 \} = N, \quad i=1, 2, \dots, M, \quad (2)$$

где  $E\{\dots\}$  – операция вычисления математического ожидания. Элементы матрицы канала  $H$  могут быть как случайными комплексными величинами, так и детерминированными комплексными числами. В последнем случае в уравнении (2) операция  $E\{\dots\}$  должна быть опущена. Модель принимаемого сигнала на входе приёмника может быть представлена в следующей форме:

$$y = Hs + \eta,$$

где  $\eta$  — комплексный случайный гауссовский вектор шумов наблюдения размерности  $M \times 1$  с нулевым средним и корреляционной матрицей

цей  $R_\eta = E\{\eta \cdot \eta'\} = 2\sigma_\eta^2 1^*$ ;  $y$  — принимаемый вектор комплексных информационных символов размерности  $M \times 1$ . Штрих здесь и далее обозначает операцию эрмитова сопряжения.

Для разнесённой передачи и приёма в системах ММО применяют методы пространственно-временного кодирования. Пространственно-временное блочное кодирование (STBC — Space Time Block Codes) является одним из простейших методов разнесённой передачи. Наиболее известна схема Аламоути [10], в которой процесс пространственно-временного кодирования осуществляется на двух временных интервалах длительности  $T$ . Пространственно-временная матрица, соответствующая схеме Аламоути, имеет вид [10]:

$$S = \begin{bmatrix} \theta_1 & -\theta_2' \\ \theta_2 & \theta_1' \end{bmatrix}.$$

На первом временном интервале символ  $\theta_1$  передаётся через антенну 1 и одновременно символ  $\theta_2$  передаётся через антенну 2. На втором временном интервале символ  $-\theta_2'$  передаётся через антенну 1 и одновременно символ  $\theta_1'$  передаётся через антенну 2. Преимуществом схемы является низкая сложность реализации оптимального по критерию правдоподобия алгоритма приёма.

Оценки увеличения пропускной способности систем связи ММО по сравнению с системами SISO рассматриваются многими авторами [3–11]. В связи с наибольшей эффективностью технологии ММО при отсутствии корреляции между отдельными радиоканалами, основное внимание уделено анализу пропускной способности систем ММО в каналах с постоянными и переменными параметрами. Пропускная способность системы связи ММО в канале с релейскими замираниями рассматривается в работах [2, 12] и др. В них показано, что фактором, определяющим увеличение пропускной способности в системах ММО, является отсутствие корреляции между сигналами из различных каналов.

Целью данной работы явилось исследование характеристик потенциальной эффективности сигнально-кодовых конструкций с пространственно-временным кодированием для систем связи, работающих в диапазоне коротких волн (3–30 МГц), вызывающих характерные искажения сигнала, значительно влияющие на помехоустойчивость.

## 2. Характеристики эффективности

Сравнение эффективности методов передачи цифровых сообщений по каналам радиосвязи производится по критериям энергетической и спектральной эффективности. В качестве универсального показателя энергетической эффективности рассматривается величина [1]  $h_b^2 = E_b/N_0$ , характеризующая энергетические затраты  $E_b$  на передачу одного бита информации для обеспечения величины средней вероятности ошибочного приёма  $p_b$  одного символа передаваемого сообщения не более заданного значения в условиях воздействия аддитивного белого гауссовского шума со спектральной плотностью средней мощности  $N_0/2$ . При этом, общепринятой методикой является проведение такого сравнения при условии, что величина  $p_b$  при использовании сравниваемых методов выбирается равной значению  $p_b^{(0)}$ , представляющему практический интерес [1]. Значения  $E_b/N_0$  вычисляются, как правило, методами статистического моделирования. В качестве показателя спектральной эффективности  $\gamma$  рассматривается удельная скорость передачи информации, определяемая как отношение  $\gamma = I'/F$  (бит/с/Гц) скорости передачи информации  $I'$  к ширине полосы занимаемых частот  $F$ .

Показатели энергетической и спектральной эффективности сигналов в каналах связи сравниваются с такими же показателями для предельного случая передачи со скоростью, равной пропускной способности непрерывного канала, определяемой соотношением [1]:

$$h_b^2 = \frac{2^\gamma - 1}{\gamma}.$$

Как видно из данной формулы, повышение энергетической эффективности системы приводит к снижению спектральной эффективности. Зависимость  $h_b^2(\gamma)$ , показанная на рис. 3 сплошной линией, называется «границей Шеннона». Область ниже кривой является недоступной для реальных систем радиосвязи даже в случае достижения потенциально возможных характеристик.

### 3. Результаты исследований

Исследование энергетической и спектральной эффективности сигнально-кодовых конструкций с пространственно-временным кодированием производилось посредством моделирования дискретного канала связи с замираниями с помощью программной модели [13], позволяющей получить оценку вероятности битовой ошибки (BER) сигнала при когерентном приеме с различными законами распределения плотности замираний и отношения сигнал-шум в канале. Для получения оценок помехоустойчивости сигналов систем ММО в условиях замираний канал связи в программной модели был усовершенствован по типу [14].

При осуществлении связи в КВ-диапазоне распространение сигнала происходит различными лучами, которые отличаются временными задержками, доплеровскими сдвигами, углами прихода, а также характеристиками деполяризации, что определяет низкий уровень их взаимной корреляции [15]. Поэтому для исследования характеристик помехоустойчивости в системах ММО использовалась единичная матрица пространственной корреляции, т.е. влияние антенн друг на друга было сведено к минимуму.

В процессе исследования для каждого значения отношения сигнал-шум от  $-10$  дБ до  $30$  дБ с шагом  $1$  дБ выполнялся расчёт программной модели, по окончании которого оценивалась вероятность битовой ошибки в принятом сообщении. Для каждой конфигурации модели

(с фиксированными параметрами сигнала и канала радиосвязи) было произведено  $10$  симуляций. Время каждой симуляции составляло  $0,1$  секунды. За время одной симуляции при скорости битового потока  $600$  Мбит/с модель накапливала выборку из  $60 \cdot 10^6$  принятых бит информации. В дальнейшем под оценкой помехоустойчивости сигнала при заданных параметрах канала понимается усреднённая из  $10$  значений вероятности битовой ошибки. Доверительный интервал [16] полученных данных составил в среднем  $\pm 0,2 \cdot 10^{-3}$  при доверительной вероятности  $99\%$ .

Исследование выполнялось на сигналах с модуляцией: QPSK и 8-PSK (4-, 8- позиционная фазовая манипуляция), а также 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM и 128-QAM (16-, 32-, 64- и 128- позиционная квадратурная амплитудная манипуляция) для систем SISO, ММО  $2 \times 2$  и ММО  $3 \times 3$  в канале связи с замираниями. Пространственно-временное кодирование осуществлялась с помощью ортогонального пространственно-временного блочного кода Аламоути (со скоростью передачи  $R=1/2$  для ММО  $2 \times 2$  и  $R=3/4$  для ММО  $3 \times 3$ ).

Семейство зависимостей полученных оценок помехоустойчивости сигнала с исследуемыми типами модуляции в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (AWGN) для разных вариантов числа передающих и приёмных антенн представлено на рис. 1.

Анализ зависимостей на рис. 1 позволяет сделать следующие выводы:

- повышение удельной скорости передачи информации  $\gamma$  за счёт применения многопозиционной квадратурной амплитудной манипуляции приводит к постепенному ухудшению помехоустойчивости сигнала в канале с аддитивным белым гауссовским шумом вне зависимости от количества передающих и приёмных антенн. Энергетический выигрыш сигнала с модуляцией QPSK по сравнению с 128-QAM приближается к  $11$  дБ;

– применение системы MIMO позволяет увеличить потенциальную помехоустойчивость приёма. Энергетический выигрыш MIMO 2×2 от SISO для сравнимых методов модуляции при  $BER = 10^{-5}$  дБ составляет более 3 дБ, а для MIMO 3×3 — более 4 дБ. Результат объясняется пространственным разнесением приёмных антенн и увеличением среднего отношения сигнал/шум после оптимального сложения сигналов с антенн.

В рамках исследования проведено моделирование эффектов замираний сигнала в каналах систем SISO и MIMO, получены оценки вероятности битовой ошибки для сигналов с исследуемыми типами сигнально-кодовых конструкций с пространственно-временным кодированием при различном уровне аддитивного белого гауссовского шума. Сигналы подвергались плоским или частотно-селективным замираниям, плотность вероятности которых распределена по законам Релея или Райса. Система зависимостей оценок помехоустойчивости, полученная для сигнала с модуляцией типа 8-PSK представлена на рис. 2.

На рис. 2 серым цветом показаны зависимости помехоустойчивости сигнала 8-PSK в каналах с аддитивным белым гауссовским шумом для систем SISO, MIMO 2×2, MIMO 3×3 — кривые идентичны на всех графиках рисунка. На графиках в левой колонке представлены результаты моделирования каналов с плоскими замираниями, в правой колонке — с частотно-селективными замираниями (показаны чёрным цветом). Как видно из графиков, присутствие плоских райсоновских замираний в канале даёт энергетический проигрыш в среднем на 2 дБ, а релейских замираний — на 15 дБ. Частотно-селективные замирания Райса увеличивают энергетический проигрыш до 5 дБ, замирания Релея уменьшают помехоустойчивость на 18 дБ.

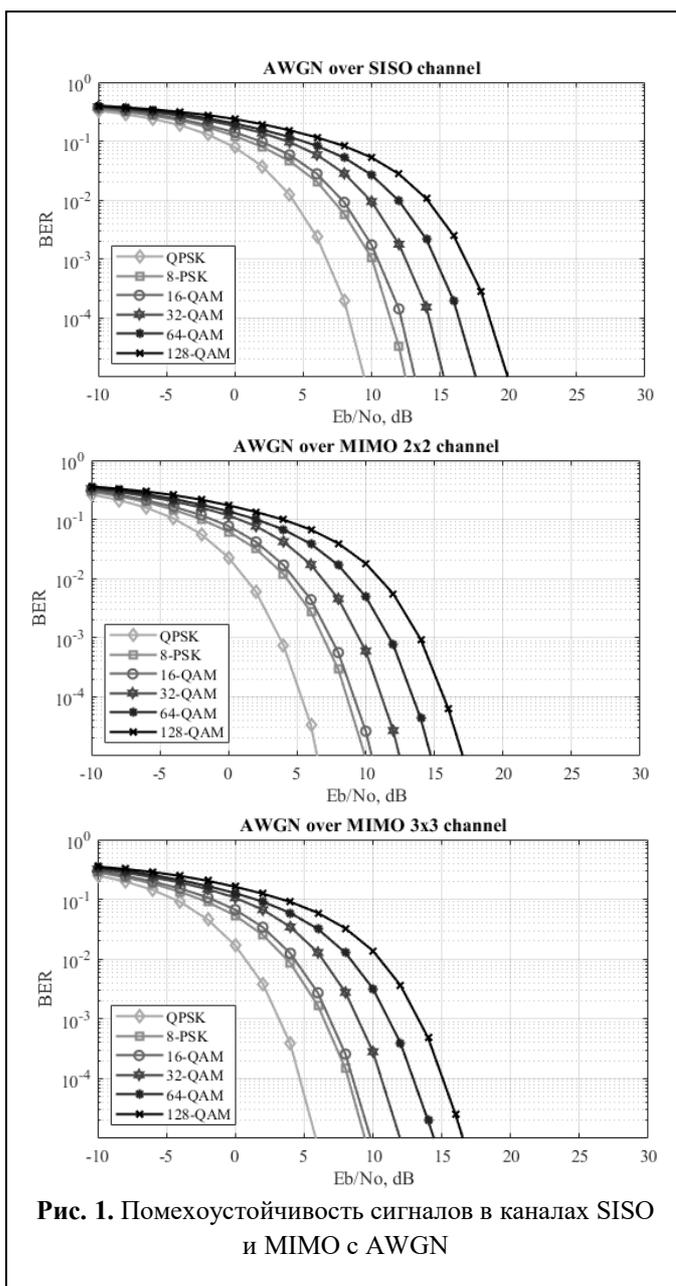


Рис. 1. Помехоустойчивость сигналов в каналах SISO и MIMO с AWGN

Обобщённые результаты расчёта помехоустойчивости при моделировании исследуемых методов передачи дискретных сообщений без кодирования при приёме с посимвольными «жёсткими» решениями сигналов в каналах с плоскими замираниями для  $p_b^{(0)} = 10^{-5}$  дБ представлены в таблице 1.

На основе полученных в результате моделирования оценок помехоустойчивости сигналов в каналах связи с замираниями произведена оценка энергетической и спектральной эффективности сигнально-кодовых конструкций

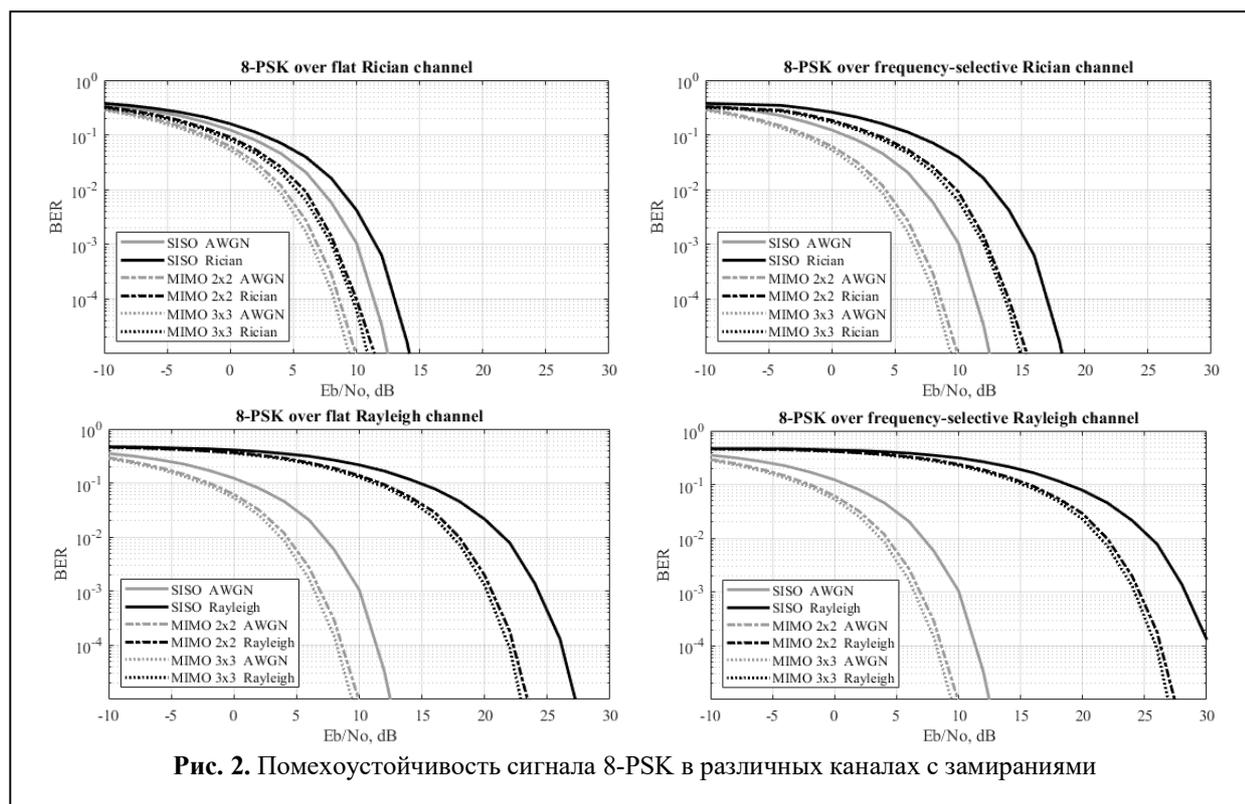


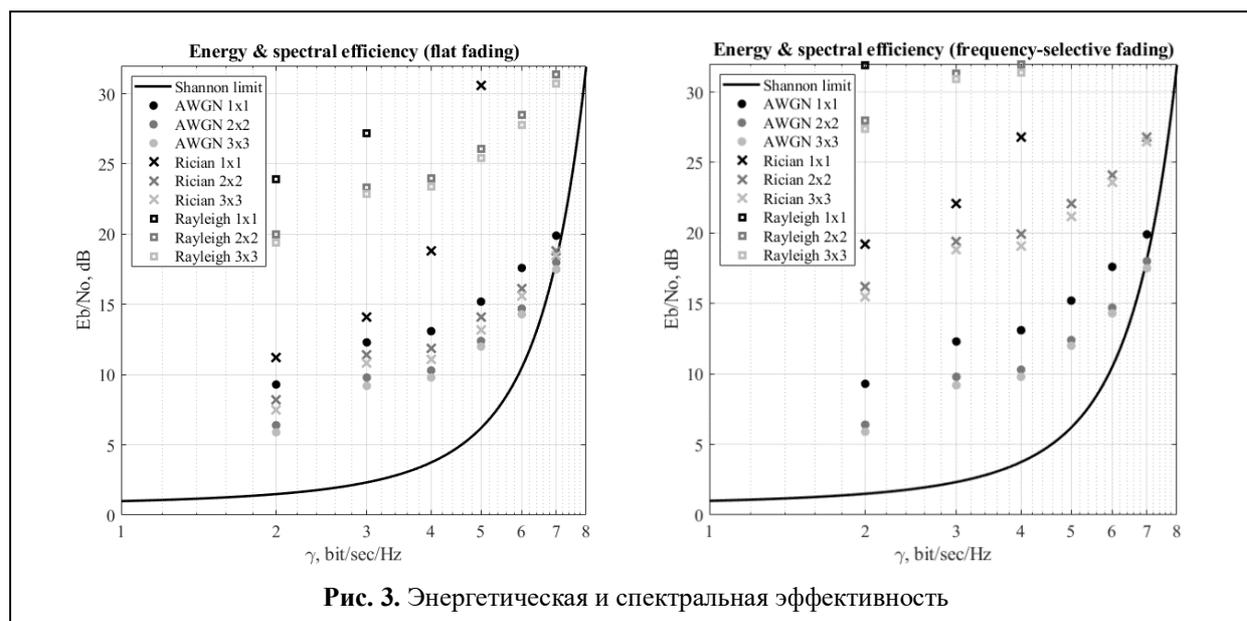
Таблица 1. Результаты помехоустойчивости сигналов в каналах связи с замиряниями

Метод модуляции	$\gamma$ , бит/с/Гц	$E_b/N_0$ , дБ								
		SISO			MIMO 2x2			MIMO 3x3		
		AWGN	Rician	Rayleigh	AWGN	Rician	Rayleigh	AWGN	Rician	Rayleigh
QPSK	2	9,3	11,2	23,9	6,4	8,2	20,0	5,9	7,5	19,4
8-PSK	3	12,3	14,1	27,2	9,8	11,4	23,3	9,2	10,8	22,9
16-QAM	4	13,1	18,8	-	10,3	11,9	24,0	9,8	11,1	23,4
32-QAM	5	15,2	30,6	-	12,4	14,1	26,1	12,0	13,2	25,4
64-QAM	6	17,6	-	-	14,7	16,1	28,5	14,3	15,6	27,8
128-QAM	7	19,9	-	-	18,0	18,8	31,4	17,5	18,5	30,7

с пространственно-временным кодированием. На рис. 3 представлены значения показателей эффективности при передаче без кодирования в сравнении с показателями для предельного случая передачи со скоростью, равной пропускной способности непрерывного канала («границей Шеннона»), для плоских и частотно-селективных замираний.

Из графика видно, что увеличение значения  $\gamma$  сопровождается ростом требуемого значения отношения  $E_b/N_0$ , при этом показатели эффективности асимптотически приближаются к границе Шеннона. По результатам анализа можно сделать следующие выводы:

- увеличение спектральной эффективности  $\gamma$  путём использования многократной фазовой модуляции (MPSK) приводит к значительным энергетическим потерям, уровень которых возможно снизить путём перехода к квадратурной амплитудной модуляции (QAM);
- увеличение энергетической эффективности  $h_b^2 = E_b/N_0$  путём использования систем MIMO приводит к энергетическому выигрышу относительно системы SISO в среднем на 3 дБ для системы 2x2 и на 4 дБ для системы 3x3 при сохранении спектральной эффективности;
- использование сигналов с высокой энергетической эффективностью уменьшает



достижимую эффективность по сравнению с оптимальной, однако оставляет её на приемлемом для практического применения уровне;

- максимальная потенциальная эффективность передачи, оцениваемая по вероятности битовой ошибки, в рассмотренных каналах связи возможна с системой ММО 3×3 для сигналов с модуляцией 128-QAM и ортогональным пространственно-временным блочным кодированием по схеме Аламоути.

### Заключение

Применение сигнально-кодовых конструкций с пространственно-временным кодированием показало высокую эффективность при программном моделировании КВ каналов связи с технологией ММО, что подтверждает возможность их применения в сложной помеховой обстановке. Дальнейшее повышение эффективности систем связи возможно при использовании совместных алгоритмов формирования и приёма сигнально-кодовых конструкций с пространственно-временным кодированием.

### Литература

1. Варгаузин В.А., Цикин И.А. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи: учебное пособие. СПб.: БХВ–Петербург, 2013. 352 с.

2. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 244 с.

3. Крейнделин В.Б., Смирнов А.Е., Бен Режеб Т.Б.К. Эффективность методов обработки сигналов в системах МУ-ММО высоких порядков // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. № 12. С. 24-30.

4. Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи / Под редакцией профессора А. М. Шломы. М.: Горячая линия–Телеком, 2008. 344 с.

5. Glushankov E., Boyko I., Kirik D., Korovin K. Development of a Modified Newton Iteration Algorithm for massive MIMO systems with precoding and its study in MATLAB environment // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2291, id.012011. DOI: 10.1088/1742-6596/2291/1/012011.

6. Glushankov E., Lyalina A., Tsvetkov D., Kirik D. Development of a software package for the research of MIMO detection techniques with space-time coding // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2023. Vol. 12564, id.125640F. Pp. 7. DOI: 10.1117/12.2669235.

7. Glushankov E., Lyalina A., Kirik D. Development of a software package for the study of MIMO systems with spectral-code constructions and space time coding // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2911, Iss. 1, id.020022. Pp. 6. DOI: 10.1063/5.0162978.

8. Глушанков Е.И., Кирик Д.И., Цветков Д.А., Курбатова Е.А. Алгоритмы демодуляции для систем ММО, основанные на псевдообращении канальной матрицы и модифицированном фильтре Калмана // Электросвязь. 2022. № 9. С. 23–26.

9. Jankiraman M. Space-Time Codes and MIMO Systems. USA, MA: Artech House, 2004. 327 p.

10. Alamouti S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1998. Vol. 16, Iss. 8. Pp. 1451–1458. DOI: 10.1109/49.730453.

11. Шадрин Б.Г., Боганков Б.С., Зачатейский Д.Е. Применение технологии ММО в системах КВ-радиосвязи // Техника радиосвязи. 2016. №4(31). С. 29–39.

12. Tulino A.M., Verdu S. Random Matrix Theory and Wireless Communications. USA, Hanover: Now Publishers Inc., 2004. 190 p.

13. Елисеев Н.К. Сравнительный анализ моделей канала связи с замираниями // 79-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2024. С. 82–85.

14. Кренкель Т.Э., Курашов Э.С. Моделирование системы ММО с использованием SIMULINK // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. № 8. С. 21–25.

15. Бузов А.Л., Красильников А.Д., Оглоблин А.В. Исследования триортогональных антенных элементов ДКМВ-диапазона для систем радиосвязи, использующих технологию ММО // Радиотехника. Техника специальной связи. 2015. №4. С. 18–22.

16. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. 88 с.

Поступила 25 декабря 2024 г.

English

## ANALYSIS OF SIGNALS' ENERGY AND SPECTRAL EFFICIENCY IN RADIO CHANNELS WITH FADING

**Evgeny Ivanovich Glushankov** — Grand Dr. in Engineering, Professor of the Department of Radio Engineering, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

E-mail: [glushankov.ei@sut.ru](mailto:glushankov.ei@sut.ru)

**Nikita Konstantinovich Eliseev** — Postgraduate student, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

E-mail: [eliseevnic.sci@gmail.com](mailto:eliseevnic.sci@gmail.com)

Address: 193232, Russian Federation, Saint Petersburg, Bolshhevikov ave., 22/1, lit. A.

*Abstract:* The article discusses the main methods for improving the efficiency of radio communication lines and presents the results of a comparative analysis of the noise immunity of signal-code structures (SCS) with space-time coding (STC) for HF radio channels with multiple transmitting and receiving antennas, additive white Gaussian noise (AWGN) and flat or frequency-selective fading. The research was carried out by modeling a discrete communication channel using a software model that allows us to estimate the probability of a bit error of the received signal. As part of the experiments, the number of transmitting and receiving antennas (so-called MIMO system), the fading density distribution law, and the signal-to-noise ratio were changing in the channel model. As a result, noise immunity estimates were obtained for QPSK, 8-PSK, as well as 16-, 32-, 64-, and 128-QAM signals at different AWGN levels in SISO, MIMO 2×2, and MIMO 3×3 channels with Rician and Rayleigh fading. The use of QAM modulation to increase the information transmission rate worsened the noise immunity of the signal, regardless of the number of transmitting and receiving antennas. The use of orthogonal space-time block coding (OSTBC) has increased the potential noise immunity of the signal for comparable modulation methods by an average of 3 dB. Fading in the communication channel led to an energy loss of comparable SCSs by an average of 4 dB for Rician fading and 17 dB for Rayleigh fading. Based on the data obtained, the indicators of the energy and spectral efficiency of SCS with STC for HF radio channels with flat and frequency-selective fading are calculated in comparison with the indicators for the limiting case – the Shannon limit. The paper shows the potential for increasing the efficiency of communication systems in fading channels when using signals with QAM and OSTBC. To further improve the efficiency of communication systems, the article outlines the directions for the future development of signal generation and receiving algorithms.

*Keywords:* energy efficiency, spectral efficiency, signal-code structures, space-time coding, modeling, HF channel, MIMO.

References

1. *Vargauzin V.A., Cikin I.A.* Methods of increasing the energy and spectral efficiency of digital radio communications: textbook. St. Petersburg: BHV–Peterburg, 2013. 352 p.
2. *Bakulin M.G., Varukina L.A., Krejndelin V.B.* MIMO technology: principles and algorithms. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom, 2014. 244 p.
3. *Krejndelin V.B., Smirnov A.E., Ben Rezheb T.B.K.* Efficiency of signal processing methods in high-order MU-MIMO systems. T-Comm: Telecommunications and transport. 2016. Vol. 10. No. 12. Pp. 24–30.
4. *Shloma A.M., Bakulin M.G., Krejndelin V.B., Shumov A.P.* New algorithms for signal generation and processing in mobile communication systems. Ed. by professor A.M. Shloma. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom, 2008. 344 p.
5. *Glushankov E., Boyko I., Kirik D., Korovin K.* Development of a Modified Newton Iteration Algorithm for massive MIMO systems with precoding and its study in MATLAB environment. Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2291, id.012011. DOI: 10.1088/1742-6596/2291/1/012011.
6. *Glushankov E., Lyalina A., Tsvetkov D., Kirik D.* Development of a software package for the research of MIMO detection techniques with space-time coding. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2023. Vol. 12564, id.125640F. Pp. 7. DOI: 10.1117/12.2669235.
7. *Glushankov E., Lyalina A., Kirik D.* Development of a software package for the study of MIMO systems with spectral-code constructions and space time coding. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2911, Iss. 1, id.020022. Pp. 6. DOI: 10.1063/5.0162978.
8. *Glushankov E.I., Kirik D.I., Cvetkov D.A., Kurbatova E.A.* Demodulation algorithms for MIMO systems based on channel matrix pseudo-circulation and modified Kalman filter. Electrosvyaz. 2022. No. 9. Pp. 23–26.
9. *Jankiraman M.* Space-Time Codes and MIMO Systems. USA, MA: Artech House, 2004. 327 p.
10. *Alamouti S.M.* A simple transmit diversity technique for wireless communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1998. Vol. 16, Iss. 8. Pp. 1451–1458. DOI: 10.1109/49.730453.
11. *Shadrin B.G., Bogankov B.S., Zachatejskij D.E.* Application of MIMO technology in HF radio communication systems. Radio communication technology. 2016. No. 4(31). Pp. 29–39.
12. *Tulino A.M., Verdu S.* Random Matrix Theory and Wireless Communications. USA, Hanover: Now Publishers Inc., 2004. 190 p. DOI:10.1516/0100000001.
13. *Eliseev N.K.* Comparative analysis of communication channel models with fading. 79th Scientific and Technical Conference of the A.S. Popov St. Petersburg Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications (NTORES), dedicated to Day of radio: collection of reports. Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI». St. Petersburg, 2024. Pp. 82–85.
14. *Krenkel' T.E., Kurashov E.S.* MIMO system simulation using SIMULINK. T-Comm: Telecommunications and transport. 2015. Vol. 9. No. 8. Pp. 21–25.
15. *Buzov A.L., Krasil'nikov A.D., Ogloblin A.V.* Studies of tri-orthogonal HF-band antenna elements for radio communication systems using MIMO technology. Radiotekhnika. Special communication technology. 2015. No. 4. Pp. 18–22.