

На правах рукописи

Тимощук Роман Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ММО И ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор
Носов Владимир Иванович

Официальные оппоненты: Райфельд Михаил Анатольевич
д-р техн. наук, доцент
Новосибирский государственный технический университет, кафедра теоретических основ радиотехники,
профессор

Абрамов Сергей Степанович
к-т техн. наук, доцент
Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, кафедра беспроводных информационных систем и сетей, заведующий кафедрой.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 18 июня 2013г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.08 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

к.т.н, доцент
Полубинский Владимир Львович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современное поколение беспроводных систем связи обеспечивает передачу различных видов информации на высоких скоростях, сохраняя при этом высокое качество. Повышение качества работы или уменьшение вероятности ошибок в системе радиосвязи при многолучевом распространении сигнала является наиболее сложной задачей. Требования, предъявляемые к современным системам беспроводной связи в области энергетической и частотной эффективности, налагают существенные ограничения на увеличение мощности передатчика и расширение занимаемой полосы частот с целью увеличения помехоустойчивости системы связи. В связи с этим, актуальность данной работы основана на исследовании современных технологий и методов повышения помехоустойчивости с помощью специальных техник кодирования сигнала, частотного разделения и пространственно-временной обработки с использованием нескольких передающих и приемных антенн.

Современным методом повышения помехоустойчивости является техника разноса передачи, которая сочетает в себе преимущества пространственного разнесения, временного кодирования и простоты обработки сигнала. Данная техника использует специальные пространственно-временные коды (STBC – Space Time Block Coding) для независимой обработки переотраженных декоррелированных сигналов. В современной радиотехнике системы с множественными передающими и приемными антеннами (MIMO – Multiple Input Multiple Output) являются популярными и входят в современные отраслевые стандарты, такие как IEEE 802.16e (WiMAX), 802.11n (Wi-Fi) и др. Аспекты применения техники разноса передачи подробно исследованы в работах современных зарубежных ученых, таких как: С.М. Аламоути (S.M.Alamouti), В. Тарох (V.Tarokh), Г. Джафархани (H.Jafarkhani), А.Р. Калдербанк (A.R.Calderbank), а также российских ученых: Слюсар В., Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Финк Л.М., Андронов И.С., Фалько А.И., Носов В.И. Материалы публикаций и результаты исследований вышеуказанных авторов развиты в данной диссертационной работе.

Проведенный анализ научных исследований, посвященных многолучевым средам, выявленные тенденции и подходы к решению задач современной радиосвязи, позволяют считать актуальным дальнейшее исследование техники разнесенной передачи. В частности, наиболее перспективными являются направления исследования, где публикации и исследования других ученых, в т.ч. и зарубежных, почти отсутствуют, а именно:

- Помехоустойчивость систем с разнесенной передачей, использующих квазиортогональное пространственно-временное кодирование (QO-STBC) - для случаев с множеством передающих антенн (более 2-х);

- Помехоустойчивость разнесенного приема OFDM сигнала по адаптивным алгоритмам с использованием пилотных сигналов, с учетом конечной скорости изменения параметров канала.

Цель работы

Исследование характеристик систем радиосвязи, использующих технологию MIMO и квазиортогональное пространственно-временное кодирование (QO-STBC), а также адаптивные методы приема сигнала OFDM с использованием обучающих последовательностей.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Разработать обобщенную корреляционную модель канала связи MISO, использующего квазиортогональное пространственно-временное кодирование сигналов, коэффициенты которой учитывают степень неортогональности векторов излучаемых сигналов и пространственную корреляцию между антеннами.
2. Разработать методику оценки помехоустойчивости MISO систем с множеством передающих и одной приемной антенной, на основе собственных чисел матрицы коэффициентов передачи канала, с учетом обобщенной корреляционной модели канала.
3. Разработать алгоритм разнесенного приема сигналов OFDM с использованием обучающей последовательности, в каналах с многолучевостью и конечной скоростью изменения параметров.
4. Разработать методику анализа помехоустойчивости синтезированных алгоритмов разнесённого приёма сигналов OFDM с использованием обучающей последовательности в каналах с многолучевостью.
5. Разработать компьютерные модели MISO-систем в среде MATLAB для случаев 2-х, 4-х, 8-ми передающих антенн, использующих методы квазиортогонального пространственно-временного кодирования.

Методы исследования

Теоретическая часть исследования основана на методах статистической радиотехники, теории вероятностей, теории матриц, математического моделирования, теории распространения радиоволн, а так же методах вычислительной математики и статистического моделирования. Экспериментальная часть исследования базируется на блочной модели системы цифровой радиосвязи, реализованной с помощью программного пакета MATLAB.

Для подтверждения полученных теоретических результатов разработаны модели MISO-систем радиосвязи с использованием 2-х, 4-х и 8-и передающих антенн в среде MATLAB, с помощью которых выполнены экспериментальные исследования.

Научная новизна результатов работы

Наиболее значимые новые научные результаты работы:

1. Разработана обобщенная корреляционная модель канала связи MISO, использующего квазиортогональное пространственно-временное кодирование сигналов, коэффициенты которой учитывают степень неортогональности векторов излучаемых сигналов и пространственную корреляцию между антеннами.
2. Разработана методика оценки помехоустойчивости MISO систем с множеством передающих и одной приемной антенной, на основе собственных чисел матрицы коэффициентов передачи канала, с учетом обобщенной корреляционной модели канала.
3. Разработан алгоритм приема сигналов OFDM с использованием обучающей последовательности в каналах с многолучевостью и конечной скоростью изменения параметров.
4. Разработана методика анализа помехоустойчивости синтезированного алгоритма разнесённого приёма сигналов OFDM с использованием обучающей последовательности в каналах с многолучевостью.
5. Разработаны компьютерные модели MISO-систем в среде MATLAB для случаев 2-х, 4-х, 8-ми передающих антенн, использующих методы квазиортогонального пространственно-временного кодирования.

В отличие от существующих исследований по классической теории разнесенного приема и ортогонального пространственно-временного кодирования, полученные методики расчета характеристик помехоустойчивости MISO-систем могут быть использованы для анализа систем с произвольным числом передающих антенн, с учетом пространственной корреляции сигналов, с использованием методов квазиортогонального кодирования сигнала.

Достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность научных выводов подтверждена результатами моделирования в среде MATLAB, в которой учтены параметры реальной среды распространения радиоволн, а также характеристики реальных устройств радиосвязи. Результаты компьютерного моделирования подтверждают корректность научных результатов, полученных в ходе исследования. Исходные данные для научных исследований были получены из ведущих российских и зарубежных научных изданий, в том числе входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ.

Практическая ценность результатов работы

Разработанные методики оценки помехоустойчивости радиосистем, учитывающие влияние нескольких факторов корреляции имеют важное практическое значение. Результаты проведенных исследований применяются в конструкторских разработках при модернизации существующих систем радиосвязи, а также при компьютерном моделировании параметров канала

связи с множественными передающими антеннами, что подтверждается Актом внедрения в процесс исследования и разработки предприятия ОАО «НПО «ЛЭМЗ».

Результаты данной работы применяются в учебном процессе на кафедре систем радиосвязи СибГУТИ и на специализированных курсах, что подтверждается соответствующим актом внедрения в учебный процесс. Формулы, используемые в работе для оценки помехоустойчивости предложенных пространственно-временных кодов, применяются в лабораторных работах по компьютерному моделированию систем радиосвязи, проводимых на кафедре СРС СибГУТИ.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно. В ходе диссертационной работы, автором были самостоятельно разработаны методики оценки помехоустойчивости систем радиосвязи с множеством передающих и приемных антенн. Автором были сделаны все аналитические выводы и выполнены численные расчеты по синтезированным алгоритмам приема. В ходе проведения экспериментального исследования, автор принимал непосредственное участие в разработке компьютерных моделей систем радиосвязи.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Международные научно-технические конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций», г. Новосибирск, 2004 г., 2005 г., 2006 г., 2007 г., 2008 г., 2009 г., 2010 г., 2011 г., 2012 г., 2013 г.

Публикации

Основные положения диссертационного исследования, а также научные и практические результаты отражены в 14 работах, опубликованных по теме диссертации, в том числе 4 входят в перечень журналов и изданий, рекомендованных ВАК, 10 публикаций – материалы докладов всероссийских научных конференций.

Основные положения работы, выносимые на защиту

1. Обобщенная корреляционная модель канала связи MISO, использующего квазиортогональное пространственно-временное кодирование сигналов, коэффициенты которой учитывают степень неортогональности векторов излучаемых сигналов и пространственную корреляцию между антеннами.
2. Методика оценки помехоустойчивости MISO систем с множеством передающих и одной приемной антенной, на основе собственных

чисел матрицы коэффициентов передачи канала, с учетом обобщенной корреляционной модели канала.

3. Алгоритм приема сигналов OFDM с использованием обучающей последовательности в каналах с многолучевостью и конечной скоростью изменения параметров.
4. Методика анализа помехоустойчивости синтезированного алгоритма разнесённого приёма сигналов OFDM с использованием обучающей последовательности в каналах с многолучевостью.
5. Результаты исследования помехоустойчивости MISO-систем для случаев 2-х, 4-х, 8-ми передающих антенн, полученные с помощью разработанных компьютерных моделей в среде MATLAB.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Диссертация содержит 136 страниц машинописного текста, 19 рисунков, 6 таблиц. В библиографию включено 79 наименований источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* дается краткое описание основных тенденций и способов повышения помехоустойчивости систем радиосвязи в многолучевых средах; выделены современные и наиболее перспективные способы повышения помехоустойчивости, такие как методы разнесенной передачи, использующие пространственно-временное кодирование сигнала, а также адаптивные методы разнесенного приема сигналов OFDM, исследование которых является актуальным на сегодняшний день. Далее приводится обзор публикаций по тематике диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* рассматриваются особенности применения пространственно-временных методов обработки сигнала (STP – Space Time Processing) на примере концепции MIMO (Multiple Input Multiple Output – Множественный Ввод Множественный Вывод). Описываются преимущества и недостатки данной технологии, а также ее практическое применение. Перечисляются основные принципы разнесенной передачи, а также способы декодирования принимаемого сигнала. Далее, в качестве основы проводимых исследований дается описание комплексного ортогонального дизайна пространственно-временных кодов, приводятся примеры кодов STBC (Space Time Block Code – Пространственно-временной Блочный Код) высоких порядков, такие как коды Тароха. Дается описание принципов квазиортогонального кодирования по схеме Джафархани, которая лежит в основе проводимых исследований в данной работе. Описываются преимущества методов адаптивного разнесенного приема сигналов OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Ортогональное Частотное

Разделение с Мультиплексированием), использующих обучение по опорным пилотным сигналам. На основе проведенного анализа существующих научных материалов, ставится задача исследования.

Во *второй главе* проводится исследование пространственно-временной корреляционной модели для радиосистем с разносом передачи.

В случае, когда коэффициент корреляции сигналов в соседних антеннах на передающем конце равен r_{TX} и на приемном конце равен r_{RX} , для определения матрицы коэффициента корреляции используются следующие выражения:

$$\mathbf{R}_{TX} = \begin{bmatrix} 1 & r_{TX} & r_{TX}^2 & \dots & r_{TX}^{N_t-1} \\ r_{TX} & 1 & r_{TX} & \dots & \dots \\ r_{TX}^2 & r_{TX} & 1 & \dots & r_{TX}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & r_{TX} \\ r_{TX}^{N_t-1} & \dots & r_{TX}^2 & r_{TX} & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{RX} = \begin{bmatrix} 1 & r_{RX} & r_{RX}^2 & \dots & r_{RX}^{N_r-1} \\ r_{RX} & 1 & r_{RX} & \dots & \dots \\ r_{RX}^2 & r_{RX} & 1 & \dots & r_{RX}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & r_{TX} \\ r_{RX}^{N_r-1} & \dots & r_{RX}^2 & r_{RX} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

В случае системы типа MISO (множественная передача, одиночный прием), результирующая корреляционная матрица равна \mathbf{R}_{TX} .

Пространственная взаимная корреляция для приемных антенн является важным параметром для разработчиков приемников, использующих пространственный разнос. Пространственная взаимно-корреляционная функция $p(d)$ (где d – расстояние) определяет насколько далеко должны отстоять антенны друг от друга для того, чтобы замирания сигналов в них были декоррелированы. В связи с этим, функция $p(d)$, с учетом усреднения по всем возможным азимутальным направлениям, вычисляется приближенно:

$$p(d) \approx \exp\left(-23\Lambda^2\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2\right), \quad (2)$$

где λ – длина волны, Λ – угловое рассеивание.

Замирания считаются достаточно декоррелированы, если $p(d) = 0.3$, что определяет статистическую длину корреляции.

Степень корреляции между передаваемыми сигналами в пространственно-временном коде зависит от степени разноса между передаваемыми кодовыми словами (векторами сигналов). Наименьшая корреляция сигналов достигается при использовании ортогональных способов передачи. Согласно определению, ортогональными называются сигналы, которые изменяются независимо и имеют нулевую корреляцию.

Ортогональность кода достигается при использовании техники кодирования Аламути, которая применяет 2 передающие антенны. При использовании большего количества передающих антенн, используются другие ортогональные коды, в т.ч. с и задержкой по времени. Ортогональность обеспечивается за счет снижения скорости кода.

Хорошим примером ортогональных кодов могут служить коды Тароха при использовании 4-х антенн:

$$C_{4,1/2} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 \\ -s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 \\ \overline{s_1} & \overline{s_2} & \overline{s_3} & \overline{s_4} \\ -\overline{s_2} & \overline{s_1} & \overline{s_4} & \overline{s_3} \\ -\overline{s_3} & \overline{s_4} & \overline{s_1} & -\overline{s_2} \\ -\overline{s_4} & -\overline{s_3} & \overline{s_2} & \overline{s_1} \end{bmatrix} \quad C_{4,3/4} = \begin{bmatrix} \overline{s_1} & \overline{s_2} & s_3 & 0 \\ -\overline{s_2} & \overline{s_1} & 0 & s_3 \\ -s_3 & 0 & \overline{s_1} & -s_2 \\ 0 & -\overline{s_3} & \overline{s_2} & s_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Данные коды достигают скоростей $r_c=1/2$ и $r_c=3/4$ соответственно.

Снижения скорости кода можно избежать, используя рекурсивное правило построения комплексного кода Уолша-Адамара для кодов высоких порядков. Полученный код дает частичную ортогональность (Q-STBC, квазиортогональные коды), т.е. не все векторы передаваемых сигналов между собой ортогональны, и обеспечивает неполный разнос, как например, код Джафархани:

$$C_{4,1} = \begin{bmatrix} \overline{s_1} & \overline{s_2} & \overline{s_3} & \overline{s_4} \\ -\overline{s_2} & \overline{s_1} & -\overline{s_4} & \overline{s_3} \\ -s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 \\ s_4 & -s_3 & -s_2 & s_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

В случае использования Q-STBC кодов, скорость кода остается полной, равной единице, но при этом кодовые слова (векторы сигналов) становятся коррелированными. Например, критерий ортогональности для кода Джафархани соблюдается только для столбцов (1 и 2), (1 и 3), (2 и 4) и (3 и 4). Степень корреляции, а значит ортогональности, определяется коэффициентом кодовой корреляции r_{STBC} .

В общем случае $0 \leq r_{STBC} \leq 1$, а в случае ортогонального кодирования сигнала $r_{STBC} = 0$. В функциональном пространстве сигналов эта степень связи может выражаться в нормированных единицах коэффициента корреляции.

В общем виде коэффициент кодовой корреляции между двумя векторами сигналов определяется по формуле:

$$r_{STBC} = \frac{(f * g)}{\|f\| \cdot \|g\|} \quad (5)$$

где $(f * g)$ - комплексная свертка векторов сигналов.

При использовании схемы Аламоути, коэффициент кодовой корреляции определяется выражением:

$$r_{STBC2} = \frac{(A_1 * A_2)}{|A_1| \cdot |A_2|} \quad (6)$$

где $A_1 = (s_1, \overline{s_2})$ и $A_2 = (s_2, -\overline{s_1})$ - векторы передаваемых сигналов с первой и со второй антенны соответственно.

Вычисление комплексной свертки двух векторов $(A_1 * A_2) = S_1 \cdot \overline{S_2} + \overline{S_2} \cdot (-\overline{S_1}) = S_1 \cdot \overline{S_2} - \overline{S_2} \cdot S_1 = 0$ показывает, что коэффициент корреляции для схемы Аламоути $r_{STBC2} = 0$.

Установлено, что в случае использования четырех или восьми передающих антенн, коэффициент кодовой корреляции зависит от типа используемой модуляции:

Тип модуляции	r_{STBC4}	r_{STBC8}
BPSK	0,5	0,375
QPSK	0,375	0,273
8-PSK	0,396	0,284

В общем виде матрица корреляции квазиортогонального кода STBC имеет вид:

$$\mathbf{R}_{STBC} = r_{STBC} \mathbf{I}_{STBC} \quad (7)$$

где r_{STBC} – коэффициент взаимной корреляции двух неортогональных векторов в квазиортогональном коде STBC, \mathbf{I}_{STBC} – единичная матрица, получаемая по рекурсивному правилу построения комплексного кода Уолша-Адамара:

$$\mathbf{I}_{STBC}^N = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{STBC}^{N/2} & -\mathbf{I}_{STBC}^{N/2} \\ -\mathbf{I}_{STBC}^{N/2} & \mathbf{I}_{STBC}^{N/2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $N = 2^n$ – количество передающих антенн (n – целое положительное число), \neg – математический оператор отрицания (not) в двоичной системе.

Формула (8) является математическим представлением рекурсивного правила Уолша-Адамара, на основе единичной матрицы \mathbf{I}_{STBC} . Следует отметить, что диагональ матрицы \mathbf{R}_{STBC} всегда равна 1, поскольку корреляция вектора с собой всегда равна 1. Правило Уолша-Адамара используется для построения матрицы коэффициентов корреляции векторов сигналов.

В *третьей главе* представлена методика оценки помехоустойчивости радиоканала, на основе вычисления собственных чисел матрицы коэффициентов передачи канала.

Вероятность ошибки при когерентном приеме с выхода n статистически неоднородных независимых релейских каналов при любом виде манипуляции, при произвольной структуре двоичных сигналов в каждом канале, определяется формулой:

$$p = \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{k=1}^n \frac{\lambda_k^{n-1}}{\prod_{\substack{p=1 \\ p \neq k}}^n (\lambda_k - \lambda_p)} \sqrt{\frac{\lambda_k}{1 + \lambda_k}} \right], \quad (9)$$

где λ_k – собственные числа матрицы \mathbf{KQ} отношений энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума.

Матрица отношений энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума \mathbf{KQ} в общем виде, без учета корреляции определяется выражением:

$$\mathbf{KQ} = \begin{bmatrix} \frac{\mu_1^2 P_c T}{2\nu_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\mu_2^2 P_c T}{2\nu_2^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\mu_{N_{TX}}^2 P_c T}{2\nu_{TX}^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

где μ_k – коэффициент передачи канала k ; $k = 1, 2, \dots, N_{TX}$; N_{TX} – количество передающих антенн в системе MISO; P_c – средняя мощность сигнала, излучаемого с одной антенны; T – длительность элемента сигнала; ν^2 – спектральная плотность мощности шума.

Известно, что отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума h_k – определяется выражением:

$$h_k^2 = \frac{\mu_k^2 P_c T}{\nu_k^2}, \quad (11)$$

где P_c – средняя мощность сигнала, излучаемого с одной антенны; T – временной интервал передачи сигнала; ν^2 – спектральная плотность мощности шума. Тогда:

$$\mathbf{KQ} = \begin{bmatrix} \frac{h_1^2}{2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{h_2^2}{2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{h_{N_{TX}}^2}{2} \end{bmatrix} = \mathbf{H}, \quad (12)$$

где \mathbf{H} – матрица отношений энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума.

Поскольку в системах MISO в рассматриваемом случае используется квазиортогональное STBC кодирование, то на снижение помехоустойчивости приема сигнала влияет не только пространственный разнос антенн (коэффициент корреляции r_{TX}), но и неортогональность кода (коэффициент корреляции r_{STBC}). Поэтому, для учета влияния двух факторов необходимо использовать коэффициент множественной корреляции R . Таким образом, матрица $\mathbf{K}_{MISO}\mathbf{Q}_{MISO}$ имеет следующий вид:

$$\mathbf{K}_{\text{MISO}}\mathbf{Q}_{\text{MISO}} = \mathbf{K}\mathbf{Q}\cdot\mathbf{R} = \mathbf{H}\cdot\mathbf{R}, \quad (13)$$

\mathbf{R} – матрица множественной корреляции, с элементами R_x , которые рассчитываются по формуле:

$$R_x = \sqrt{\mathbf{C}^T \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \mathbf{C}}, \quad (14)$$

где \mathbf{C} – вектор коэффициентов корреляции различных влияющих факторов, \mathbf{R}_{xx} – матрица коэффициентов взаимной корреляции между этими факторами. Значение \mathbf{C} и \mathbf{R}_{xx} определяются по формулам:

$$\mathbf{C} = [r_{TX} \quad r_{STBC}] \quad \mathbf{R}_{\text{xx}} = \begin{bmatrix} 1 & r_{TX_i} r_{STBC_i} \\ r_{TX_i} r_{STBC_i} & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

где r_{TX_i} – элемент матрицы пространственной корреляции, рассчитанной по формуле (2), r_{STBC_i} – элемент матрицы корреляции передаваемых сигналов, рассчитанной по формуле (5).

Подставляя (15) в (14), получим коэффициент множественной корреляции R_x :

$$R_x = \sqrt{\begin{bmatrix} r_{TX} \\ r_{STBC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{r_{TX}^2 r_{STBC}^2 - 1} & \frac{r_{TX} r_{STBC}}{r_{TX}^2 r_{STBC}^2 - 1} \\ \frac{r_{TX} r_{STBC}}{r_{TX}^2 r_{STBC}^2 - 1} & -\frac{1}{r_{TX}^2 r_{STBC}^2 - 1} \end{bmatrix} \cdot [r_{TX}; r_{STBC}]} \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что коэффициент множественной корреляции при ненулевой корреляции между антеннами и ненулевой корреляции между кодовыми словами (R_x) определяется выражением:

$$R_x = \sqrt{\frac{r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - 2r_{TX}^2 r_{STBC}^2}{1 - r_{TX}^2 r_{STBC}^2}}, \quad (17)$$

Заметим, что при любых $\mathbf{C} = [r_{TX} \quad r_{STBC}]$ результирующий коэффициент корреляции всегда больше или равен наибольшему коэффициенту корреляции.

Подставляя (12) и (17) в (13) получим матрицу отношений энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума:

$$\mathbf{K}_{\text{MISO}} \mathbf{Q}_{\text{MISO}} =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{h_1^2}{2} & \frac{h_1^2}{2} \sqrt{\frac{r_{TX}^2 + r_{STBC_i}^2 - 2r_{TX}^2 r_{STBC_i}^2}{1 - r_{TX}^2 r_{STBC_i}^2}} & \dots \\ \frac{h_2^2}{2} \sqrt{\frac{r_{TX}^2 + r_{STBC_i}^2 - 2r_{TX}^2 r_{STBC_i}^2}{1 - r_{TX}^2 r_{STBC_i}^2}} & \frac{h_2^2}{2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ \frac{h_N^2}{2} \sqrt{\frac{r_{TX}^{N-1+2} + r_{STBC_i}^2 - 2r_{TX}^{N-1+2} r_{STBC_i}^2}{1 - r_{TX}^{N-1+2} r_{STBC_i}^2}} & \frac{h_N^2}{2} \sqrt{\frac{r_{TX}^{N-2+2} + r_{STBC_i}^2 - 2r_{TX}^{N-2+2} r_{STBC_i}^2}{1 - r_{TX}^{N-2+2} r_{STBC_i}^2}} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \frac{h_1^2}{2} \sqrt{\frac{r_{TX}^{N-1+2} + r_{STBC_i}^2 - 2r_{TX}^{N-1+2} r_{STBC_i}^2}{1 - r_{TX}^{N-1+2} r_{STBC_i}^2}} & \dots \\ \dots & \frac{h_2^2}{2} \sqrt{\frac{r_{TX}^{N-2+2} + r_{STBC_i}^2 - 2r_{TX}^{N-2+2} r_{STBC_i}^2}{1 - r_{TX}^{N-2+2} r_{STBC_i}^2}} & \dots \\ \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{h_N^2}{2} & \dots \end{bmatrix} \quad (18)$$

где h_i^2 – отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума i -го канала; r_{STBC_i} – элемент матрицы \mathbf{R}_{stbc} коэффициентов корреляции кода STBC; N – количество передающих антенн; r_{TX} – коэффициент пространственной корреляции между антеннами, рассчитанный по формуле (2).

Полученная формула (18) является корреляционной моделью канала для системы MISO с M передающими антеннами, для любых каналов передачи с релейскими замираниями h_i^2 , рассчитанными для каждой антенны, с учетом пространственной корреляции между антеннами r_{TX} , а также с учетом неортогональности (r_{STBC}) любого пространственно-временного кода STBC.

Вычисление собственных чисел λ_k матрицы (18) является непростой задачей, т.к. для этого необходимо найти корни уравнения:

$$|\mathbf{K}_{\text{MISO}} \mathbf{Q}_{\text{MISO}} - \lambda \mathbf{I}| = 0 \quad (19)$$

где $|\cdot|$ – детерминант матрицы, а \mathbf{I} – единичная матрица.

Для нахождения собственных чисел некоторых матриц, воспользуемся программным средством математических вычислений MathCad.

Рассмотрим наиболее простые результаты аналитических расчетов в общем (аналитическом виде) для случаев с 2-я, 4-я и 8-ю передающими антеннами.

Для случая MISO системы с 2-мя передающими антеннами, матрица отношений энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума равна:

$$\mathbf{K}_{\text{MISO}} \mathbf{Q}_{\text{MISO}} = \frac{h^2}{2} \begin{bmatrix} 1 & r_{TX} \\ r_{TX} & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Тогда собственные числа матрицы $\mathbf{K}_{\text{MISO}}\mathbf{Q}_{\text{MISO}}$ для 2-х антенн равны:

$$\lambda_1 = \frac{h^2}{2}(1+r_{TX}) \quad \lambda_2 = \frac{h^2}{2}(1-r_{TX}) \quad (21)$$

Поскольку любой STBC-код размера 2×2 является ортогональным, то $r_{\text{STBC}} = 0$ для двух любых сигналов. Вероятность ошибки, вычисленная для данного случая равна:

$$p_2 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1+r_{TX}}{2r_{TX}} \sqrt{\frac{(1+r_{TX})h^2}{(1+r_{TX})h^2+2}} + \frac{1-r_{TX}}{2r_{TX}} \sqrt{\frac{(1-r_{TX})h^2}{(1-r_{TX})h^2+2}} \right] \quad (22)$$

Полученный результат для системы MISO полностью совпадает с классической теорией помехоустойчивости разнесенного приема, где используется система SIMO.

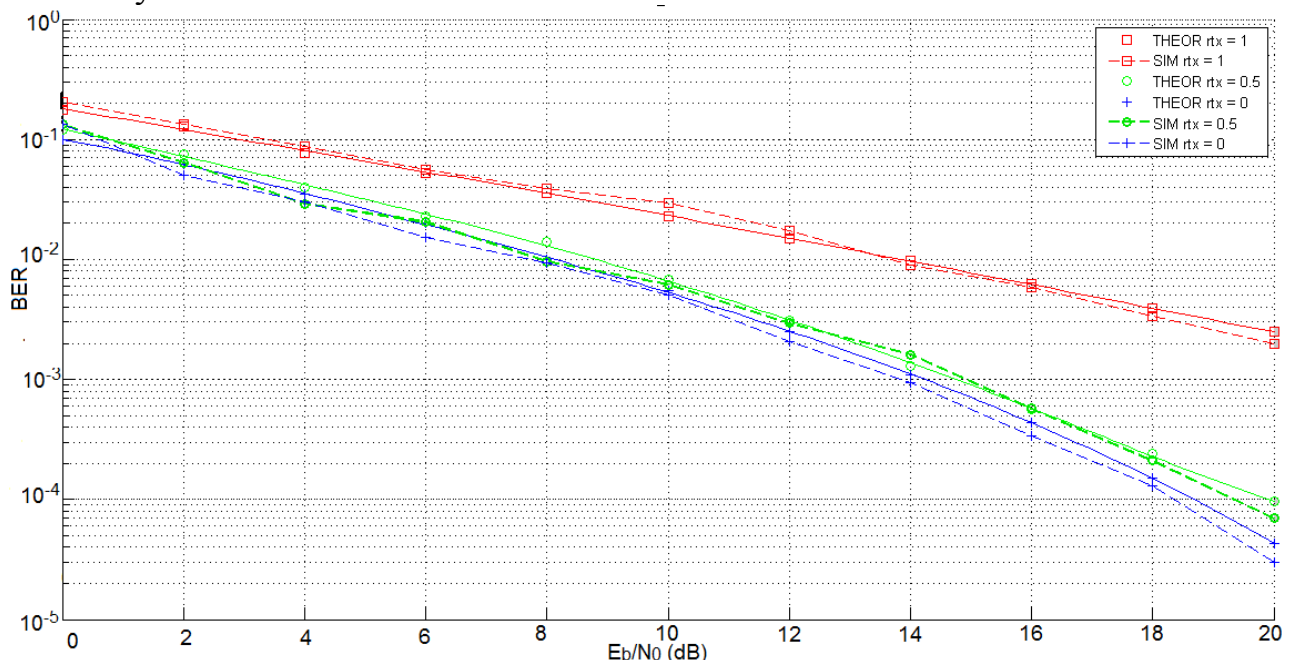


Рисунок 1 – Зависимость вероятности ошибки от E_b/N_0 для 2-х антенной системы MISO с кодом Аламути при модуляции BPSK, для коэффициентов пространственной корреляции $r_{TX} = 1$ (красный); 0.5 (зеленый); 0 (синий)

Данный результат получен, исходя из предположения, что мощность сигнала, излучаемого с каждой антенны в системе MISO равна мощности, излучаемой одной антенной при разнесенном приеме. Но в реальных системах MISO полная мощность, как правило, делится поровну между всеми передающими антеннами. При этом помехоустойчивость системы ухудшается, поскольку отношение полной энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума h_i^2 для каждого канала равен:

$$h_i^2 = \frac{h_S^2}{N_t} \quad (23)$$

где h_S – отношение полной энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума. В этом случае, при $N_t = 2$, формула (43) примет вид:

$$P_2 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1+r_{TX}}{2r_{TX}} \sqrt{\frac{(1+r_{TX})h_S^2}{(1+r_{TX})h_S^2+4}} + \frac{1-r_{TX}}{2r_{TX}} \sqrt{\frac{(1-r_{TX})h_S^2}{(1-r_{TX})h_S^2+4}} \right] \quad (24)$$

Графики функций, построенных по формуле (24) (обозначены сплошной линией) на рисунке 1 показывают, что при росте пространственной корреляции наблюдается значительное ухудшение помехоустойчивости для системы MISO с двумя передающими антеннами. Так, при вероятности ошибки 10^{-3} наблюдается проигрыш по помехоустойчивости на 5 дБ системы с коэффициентом пространственной корреляции $r_{TX} = 1$ по сравнению с системой, с коэффициентом пространственной корреляции $r_{TX} = 0,5$.

Компьютерное моделирование систем с различными коэффициентами пространственной корреляции подтверждает теоретическое исследование помехоустойчивости по разработанной методике, по формуле (18). Моделирование проводилось с помощью специального инструмента анализа VERTool, входящего в программный пакет MATLAB. При моделировании использовалась модуляция BPSK. Графики зависимости вероятности ошибки от отношения E_b/N_0 (показаны пунктирной линией) отличаются от теоретических зависимостей на 0,5 дБ для случая с $r_{TX} = 1$ и менее 0,2 дБ для случая с $r_{TX} = 0$, что остается в рамках допустимой погрешности вычислений.

Матрица отношений энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума для 4-х антенной системы определяется выражением:

$$\mathbf{K}_{\text{MISO}}\mathbf{Q}_{\text{MISO}} = \frac{h_S^2}{8} \begin{bmatrix} 1 & r_{TX} & 0 & r_{STBC} \\ r_{TX} & 1 & \sqrt{\frac{r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - 2r_{TX}^2 r_{STBC}^2}{1 - r_{TX}^2 r_{STBC}^2}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - 2r_{TX}^2 r_{STBC}^2}{1 - r_{TX}^2 r_{STBC}^2}} & 1 & r_{TX} \\ r_{STBC} & 0 & r_{TX} & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Собственные числа матрицы $\mathbf{K}_{\text{MISO}}\mathbf{Q}_{\text{MISO}}$ для 4-х передающих антенн и квазиортогонального STBC-кода равны:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{h_S^2}{8} \left[1 - \frac{r_{STBC}}{2} - \frac{r_{TX}}{2} - \frac{\sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2}}{2} \right] \\ \lambda_2 &= \frac{h_S^2}{8} \left[1 - \frac{r_{STBC}}{2} - \frac{r_{TX}}{2} + \frac{\sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2}}{2} \right] \\ \lambda_3 &= \frac{h_S^2}{8} \left[1 + \frac{r_{STBC}}{2} + \frac{r_{TX}}{2} - \frac{\sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2}}{2} \right] \\ \lambda_4 &= \frac{h_S^2}{8} \left[1 + \frac{r_{STBC}}{2} + \frac{r_{TX}}{2} + \frac{\sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2}}{2} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

Вероятность ошибки определяется в общем виде по формуле:

$$\begin{aligned}
 P_4 = & \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{h_S^2 \left(R_x + r_{STBC} + \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - 2} \right)}{R_x h_S^2 + h_S^2 r_{STBC} - 2h_S^2 + h_S^2 \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2} - 16} \left(R_x + r_{STBC} + \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - 2} \right)^3}{16(R_x + r_{STBC}) \left(R_x + r_{STBC} + \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2} \right) \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2}} + \\
 & + \frac{\sqrt{\frac{h_S^2 \left(R_x + r_{STBC} - \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - 2} \right)}{R_x h_S^2 + h_S^2 r_{STBC} - 2h_S^2 - h_S^2 \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2} - 16} \left(R_x + r_{STBC} - \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 - 2} \right)^3}{16(R_x + r_{STBC}) \left(R_x + r_{STBC} - \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2} \right) \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2}} - \\
 & - \frac{\sqrt{\frac{h_S^2 \left(R_x + r_{STBC} + \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 + 2} \right)}{R_x h_S^2 + h_S^2 r_{STBC} + 2h_S^2 + h_S^2 \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2} + 16} \left(R_x + r_{STBC} + \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 + 2} \right)^3}{16(R_x + r_{STBC}) \left(R_x + r_{STBC} + \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2} \right) \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2}} + \\
 & + \frac{\sqrt{\frac{h_S^2 \left(R_x + r_{STBC} - \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 + 2} \right)}{R_x h_S^2 + h_S^2 r_{STBC} + 2h_S^2 - h_S^2 \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2} + 16} \left(R_x + r_{STBC} - \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2 + 2} \right)^3}{16(R_x + r_{STBC}) \left(R_x + r_{STBC} - \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2} \right) \sqrt{R_x^2 - 2R_x r_{STBC} + 4r_{TX}^2 + r_{STBC}^2}}
 \end{aligned} \tag{27}$$

На рисунке 2 показана помехоустойчивость данной системы при разных коэффициентах корреляции.

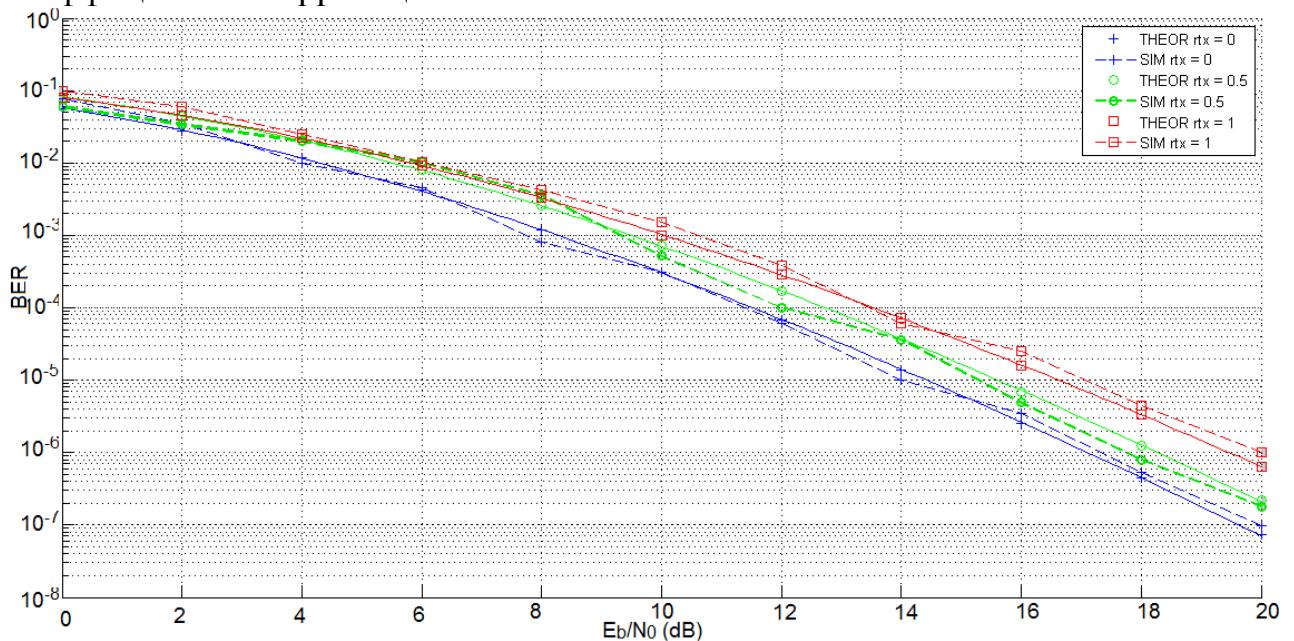


Рисунок 2 – Зависимость вероятности ошибки от E_b/N_0 для 4-х антенной системы MISO с квазиортогональным кодом, для коэффициентов пространственной корреляции $r_{TX} = 1$ (красный); 0.5 (зеленый); 0 (синий) и коэффициента кодовой корреляции $r_{STBC} = 0.5$.

В отличие от системы MISO с двумя передающими антеннами, в данном случае, пространственная корреляция оказывает значительное влияние только для соседних антенн. При этом пространственно-временное кодирование, за счет разнесения векторов сигнала, позволяет успешно бороться с помехами, поэтому проигрыш по помехоустойчивости системы с $r_{TX} = 1$ по сравнению с системой с $r_{TX} = 0.5$ уже не такой значительный – 0,5 дБ при той же вероятности ошибки 10^{-3} .

Очевидно, что для 8-ми и более антенных систем нет смысла приводить формулу помехоустойчивости в аналитическом виде, поскольку она довольно громоздкая. Достаточно рассмотреть несколько примеров помехоустойчивости для конкретных значений r_{TX} и r_{STBC} (рисунок 3).

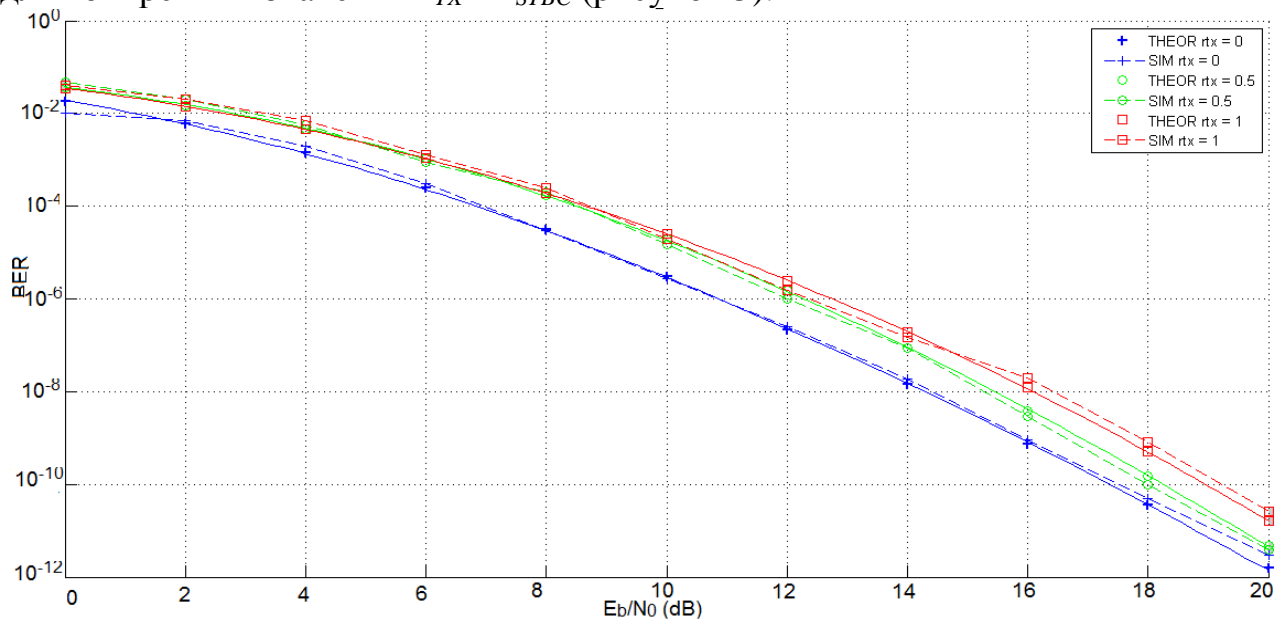


Рисунок 3 – Зависимость вероятности ошибки от E_b/N_0 для 8-ми антенной системы MISO с квазиортогональным кодом, для коэффициентов пространственной корреляции $r_{TX} = 1$ (красный); 0.5 (зеленый); 0 (синий) и коэффициента кодовой корреляции $r_{STBC} = 0.5$.

В случае с 8-ю передающими антеннами влияние пространственной корреляции удастся еще более уменьшить (по сравнению с 2-х и 4-х антенными системами) за счет большого количества антенн и, соответственно, более эффективного разнесения сигнала между антеннами, который детектируется и обрабатывается на приеме. Таким образом, графики помехоустойчивости системы при коэффициенте $r_{TX} = 1$ и коэффициенте $r_{TX} = 0.5$ отличаются на 0,1 дБ при вероятности ошибки 10^{-3} . Данный результат говорит о том, что увеличение количества антенн MISO системы, использующей квазиортогональное кодирование, является эффективным методом борьбы с пространственной корреляцией.

Однако, с ростом числа антенн, возрастает корреляция между векторами передаваемых сигналов, вследствие их неортогональности.

На рисунке 4 показаны графики помехоустойчивости различных систем MISO, использующих 2, 4 и 8 передающих антенн, при фиксированном коэффициенте пространственной корреляции $r_{TX} = 0.5$.

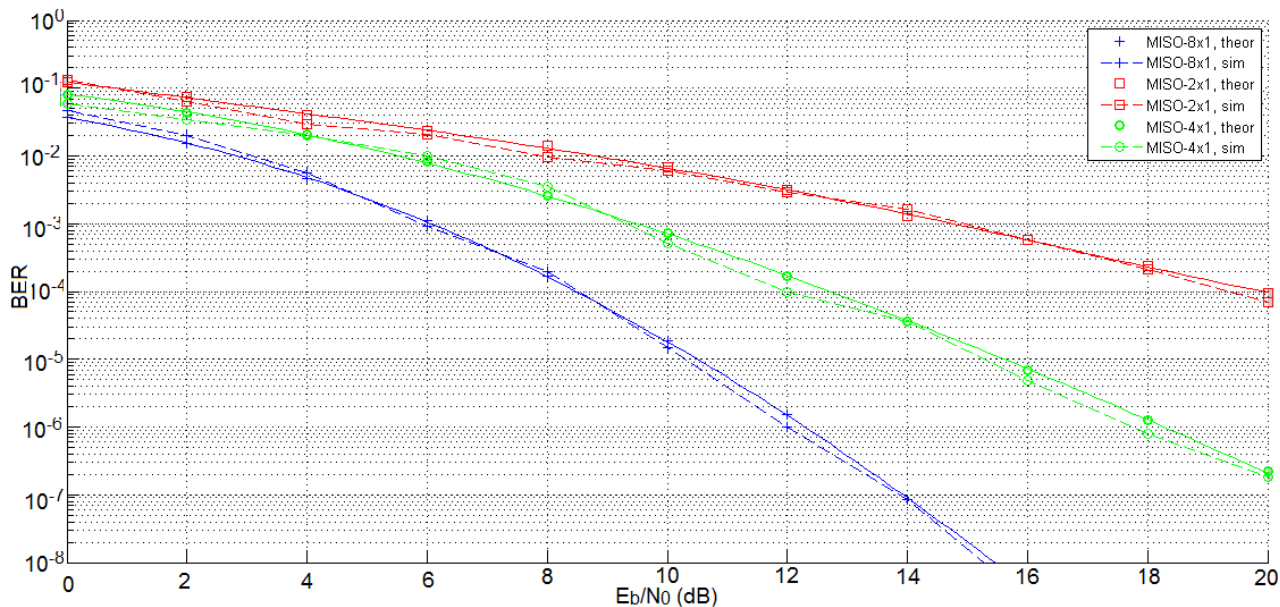


Рисунок 4 – Зависимость вероятности ошибки от E_b/N_0 для 2-х (красный), 4-х (зеленый) и 8-ми (синий) антенной системы MISO при фиксированном коэффициенте пространственной корреляции $r_{TX} = 0.5$.

На рисунке 4 показано, что в случае, когда коэффициент пространственной корреляции зафиксирован на уровне $r_{TX} = 0,5$ для систем MISO с различным числом передающих антенн (2, 4, 8), помехоустойчивость системы не растет пропорционально с ростом количества антенн, а замедляется. Это объясняется тем, что при небольшом количестве передающих антенн (2 и 4) пространственная корреляция между антеннами оказывает сильное влияние, что сопровождается ухудшением помехоустойчивости системы. Например, при изменении коэффициента пространственной корреляции r_{TX} на 0,5 (с 0,5 до 1) помехоустойчивость системы ухудшается на 5 дБ, в случае 2-х передающих антенн и на 0,5 дБ в случае 4-х антенн. С ростом количества антенн, пространственно-временное кодирование позволяет преодолеть негативное влияние пространственной корреляции за счет пространственного разнеса излучаемых векторов сигналов, таким образом, обеспечивая избыточность в пространстве и во времени. Система MISO с 4-мя антеннами проигрывает по помехоустойчивости системе MISO с 8-ю антеннами 3,5 дБ при вероятности ошибки 10^{-3} . При этом 4-х антенная система лучше по помехоустойчивости, чем 2-х антенная система на 5 дБ при том же коэффициенте ошибки 10^{-3} . Этот эффект объясняется тем, что пространственная корреляция оказывает значимое влияние только между соседними антеннами, в то время как пространственно-временное кодирование распределяет вектора сигналов равномерно по всем антеннам. Следовательно, увеличение числа передающих антенн способствует росту помехоустойчивости системы радиосвязи. Однако, как видно из рисунка 4, с ростом числа антенн, улучшение помехоустойчивости системы MISO замедляется (5 дБ при переходе от 2-х антенн к 4-м и 3,5 дБ при переходе от 4-х антенн к 8-ми при BER 10^{-3}), поскольку взаимная корреляция сигналов между антеннами в случае квазиортогонального кодирования возрастает.

В случае использования технологии OFDM, адаптивный алгоритм приёма с обучением определяется отношением правдоподобия, в котором неизвестные априорные распределения параметров заменены апостериорными, сформированными при помощи обучающей выборки. В соответствии с критерием максимального правдоподобия для априорно равновероятных передаваемых сигналов адаптивный алгоритм определяется неравенством:

$$\sum_{q=1}^Q \left(m_{cq}^{(M)} X_{rq} + m_{sq}^{(M)} Y_{rq} \right) > \sum_{q=1}^Q \left(m_{cq}^{(M)} X_{lq} + m_{sq}^{(M)} Y_{lq} \right), r \neq l, \quad (28)$$

Здесь

$$X_{rq} = \int_{MT}^{(M+1)T} Z'_q(t) Z_r(t) dt, \quad Y_{rq} = \int_{MT}^{(M+1)T} Z'_q(t) \tilde{Z}_r(t) dt, \quad (29)$$

– корреляционные интегралы, вычисленные на интервале $MT \dots (M+1)T$ после формирования оценок $m_{cq}^{(M)}$ и $m_{sq}^{(M)}$; $Z'_q(t)$ – принятая смесь сигнала с помехами в q -й ($q=1,2,\dots,Q$) ветви разнесения; $Z_r(t)$ – передаваемый сигнал; Q – число ветвей разнесения; M – размер обучающей выборки; T – длительность OFDM символа; r, l – элементы алфавита сигнала.

Решающее правило (28) является алгоритмом квадратурной корреляционной обработки сигналов одной поднесущей ресурсного блока, в котором оценки параметров канала сформированы при помощи обучающей выборки опорных сигналов. Результаты обработки по алгоритму (28) мультиплексируются в один поток данных ресурсного блока.

Анализ помехоустойчивости разнесенного приема сигналов OFDM на основе синтезированного алгоритма (28) приводит к формуле вероятности ошибки:

$$p \approx \frac{C_{2Q-1}^Q}{2^Q} \prod_{q=1}^Q \left[1 - \frac{\overline{h_q^2} r_{3q}}{\sqrt{\left(\overline{h_q^2} r_{1q} + \frac{1}{M} \right) \left(\overline{h_q^2} r_{2q} + 1 \right)}} \right] \quad (30)$$

где r_{1q}, r_{2q}, r_{3q} – взаимная корреляционная функция ортогональных составляющих опорного и информационных сигналов на 3-х различных интервалах корреляции; C_{2Q-1}^Q – коэффициент, учитывающий значение собственных чисел матрицы ковариаций $\mathbf{K}_q \mathbf{J}_q$.

Из (30) видно, что вероятность ошибки зависит от отношения энергии символа к спектральной плотности мощности шума $\overline{h_q^2}$, от размера обучающей выборки M и от коэффициентов, характеризующих скорость изменения параметров сигнала r_{1q}, r_{2q}, r_{3q} .

На рисунке 5 приведены зависимости вероятности ошибки p от размера обучающей выборки M при разных Q (число ветвей разнесения) вычисленные по формуле (30), в предположении $\overline{h_q^2} = \overline{h^2} = 10^2$ (одинаковая средняя

интенсивность сигналов разных ветвей разнесения), при гауссовской аппроксимации $R_q(t_1, t_2)$ при $T/\tau_k = 10^{-2}$ (сплошные линии) и при $T/\tau_k = 5 \cdot 10^{-2}$ (штриховые линии). Здесь же для сравнения приведены зависимости потенциальной помехоустойчивости при $r_{1q} \approx r_{2q} \approx r_{3q} \approx 1$ (штрихпунктирные линии), что практически соответствует значению $T/\tau_k \approx 10^{-3}$.

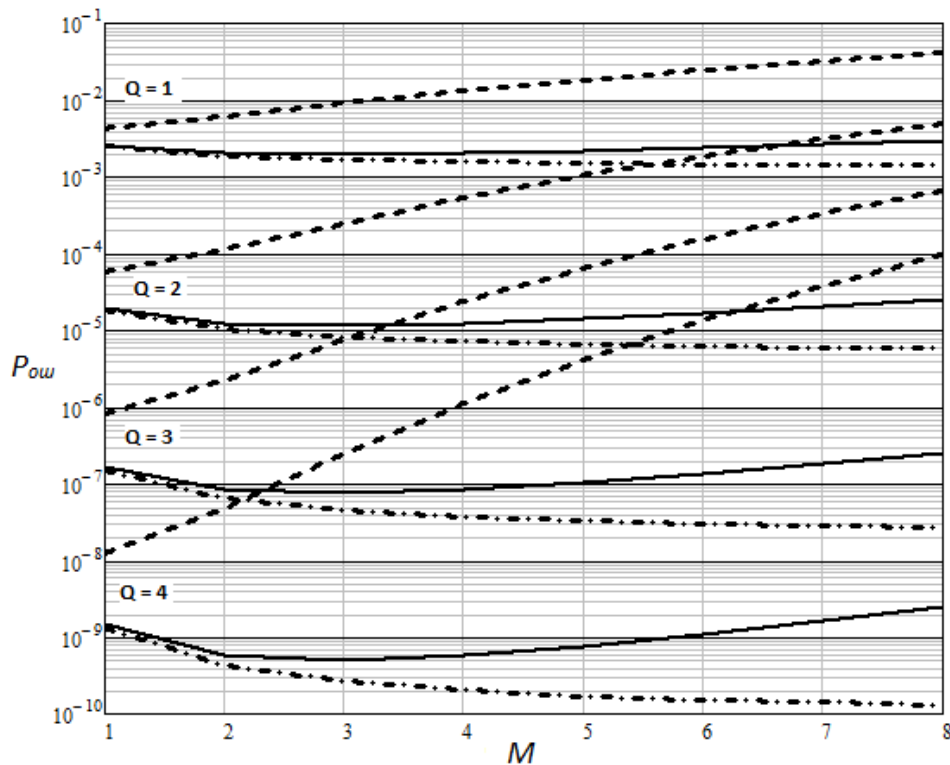


Рисунок 5 – Зависимости вероятности ошибки от размера обучающей выборки (гауссовская аппроксимация)

Из приведённых зависимостей видно, что при $T/\tau_k = 10^{-2}$ заметное уменьшение вероятности ошибки происходит на первых двух-трёх интервалах обучения, затем уменьшение вероятности ошибки замедляется и при $M > 7$, вероятность ошибки будет возрастать вследствие декорреляции измеренных параметров сигнала. С увеличением M повышение помехоустойчивости приёма происходит более эффективно при большом числе ветвей разнесения. В рассматриваемых условиях значение $T/\tau_k = 10^{-2}$ можно считать количественной оценкой (мерой) «медленности» замираний при гауссовской аппроксимации $R_q(t_1, t_2)$. При $T/\tau_k = 5 \cdot 10^{-2}$ вероятность ошибки при $M = 2$ практически не уменьшается по сравнению с $M = 1$, а при $M > 2$ вероятность ошибки возрастает вследствие декорреляции измеренных параметров сигнала. Величина $T/\tau_k = 5 \cdot 10^{-2}$ близка к границе, характеризующей быстрые замирания, когда обучение на интервале $M > 1$ нецелесообразно. Монотонное уменьшение вероятности ошибки с увеличением N наблюдается только при $r_{1q} \approx r_{2q} \approx r_{3q} \approx 1$ (практически при $T/\tau_k \approx 10^{-3}$), однако и в этих условиях целесообразно осуществлять обучение на интервале не более двух трёх

элементов обучающей выборки, т.к. далее уменьшение вероятности ошибок сильно замедляется.

Из рисунка 5 видно замедление в уменьшении вероятности ошибки с увеличением $\overline{h^2}$ вследствие декорреляции параметров сигнала из-за конечной скорости замираний, однако адаптивный приём и в таких условиях обеспечивает высокую достоверность связи в системах с OFDM и даже при высокой скорости движения абонента (в LTE до $v = 350$ км/ч).

Таким образом, приём с обучением по опорным (пилотным) сигналам, в каналах с гауссовской корреляционной функцией замираний $R_q(t_1, t_2)$ незначительно проигрывает оптимальному приёму при медленных (по сравнению с длительностью OFDM-символа) общих замираниях, которые наблюдаются в каналах функционирования систем WiMAX, Wi-Fi, LTE.

Для полноты картины на рисунках 6 и 7 приведены зависимости вероятности ошибки p от $\overline{h^2}$ при разных $Q = 1, 2, 3, 4$ при обучении на интервале $M = 1$ при гауссовской и экспоненциальной аппроксимации $R_q(t_1, t_2)$. Зависимости построены при $T/\tau_k = 10^{-2}$ (сплошные линии) и при $T/\tau_k = 10^{-3}$ (пунктир). Штрихпунктирными линиями показаны зависимости вероятности ошибки когерентного разнесённого приёма (потенциальная помехоустойчивость).

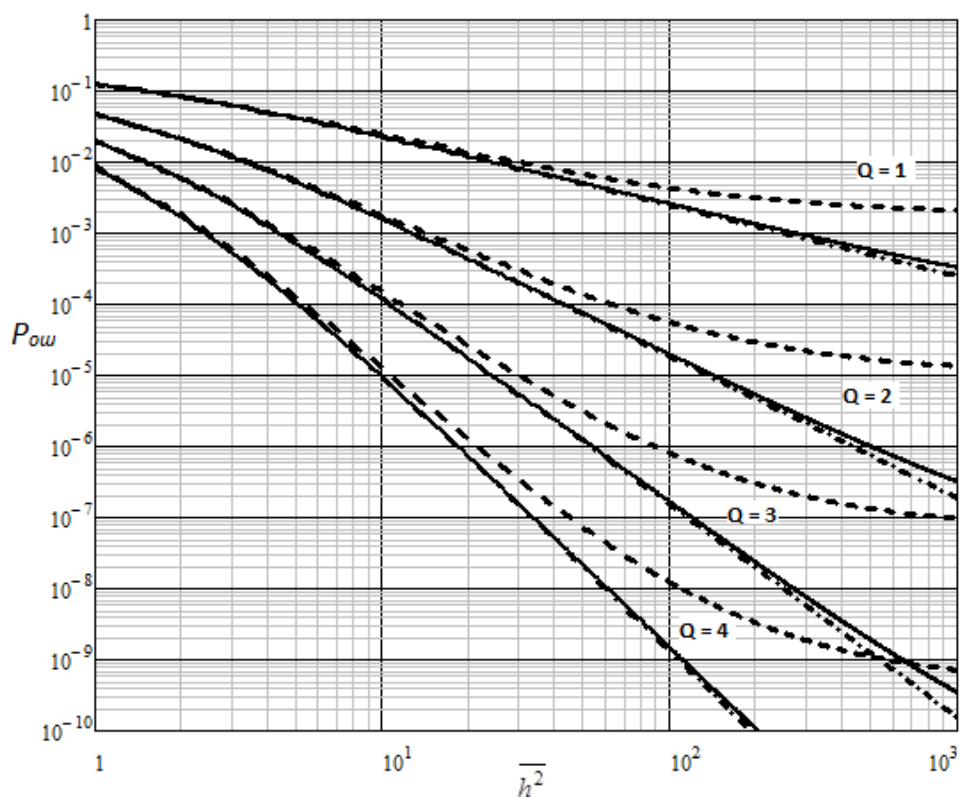


Рисунок 6 – Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум (гауссовская аппроксимация)

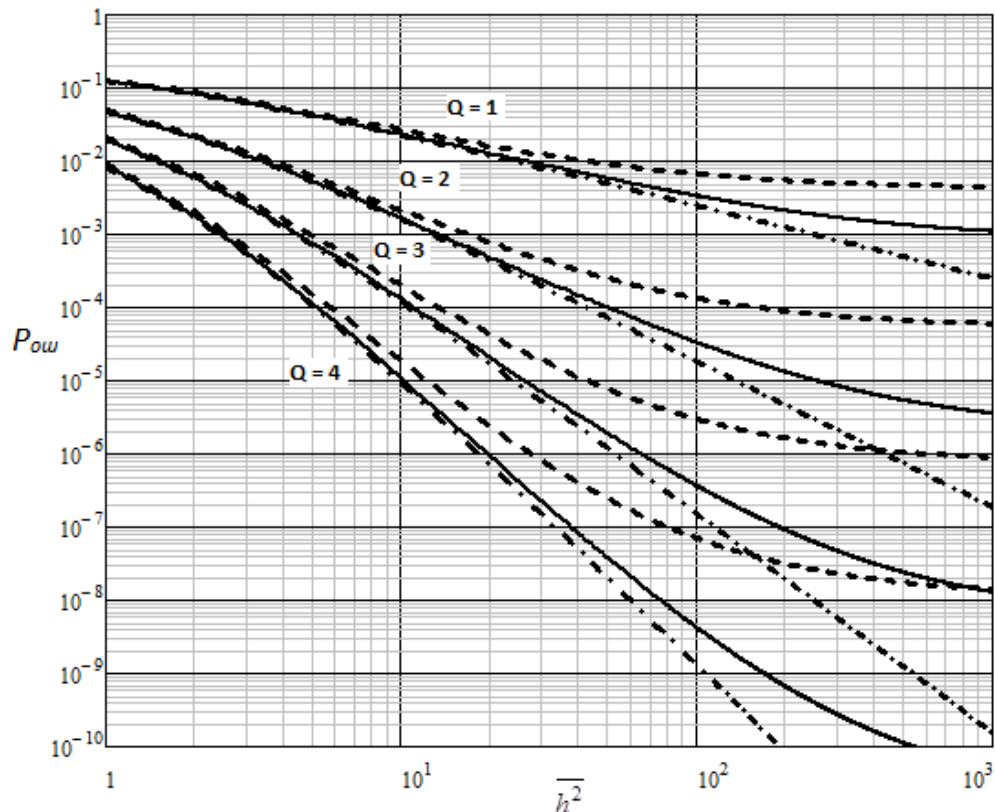


Рисунок 7 – Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум (экспоненциальная аппроксимация)

Из рисунков 6 и 7 видно, что при экспоненциальной аппроксимации, замедление в уменьшении вероятности ошибки при увеличении $\overline{h^2}$ происходит гораздо быстрее, чем при гауссовской аппроксимации, вследствие декорреляции измеренных параметров сигнала.

В четвертой главе описываются основные принципы компьютерного моделирования в среде MATLAB. Описываются компьютерные модели систем связи, на которых проводятся исследования характеристик помехоустойчивости. Подробно рассматриваются 3 разработанных модели систем MISO: с 2-мя, 4-мя и 8-ю передающими антеннами. Далее проводится сравнительный анализ результатов исследования, полученных теоретическим путем в разделе 3 с результатами компьютерного моделирования. Экспериментальные характеристики подтверждают теоретические исследования, представленные в разделе 3.

Заключение содержит формулировку основных научных и практических результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В отличие от существующих исследований по классической теории разнесенного приема, а также современных исследований ортогонального пространственно-временного кодирования, проведенное исследование, позволяет применять полученные методики для расчета характеристик помехоустойчивости MISO-систем, использующих квазиортогональное

кодирование сигнала, с произвольным числом передающих антенн, с учетом влияния пространственной и кодовой корреляции сигналов. В ходе исследования решен ряд задач:

1. Разработана обобщенная корреляционная модель канала связи MISO, использующего квазиортогональное пространственно-временное кодирование сигналов, коэффициенты которой учитывают степень неортогональности векторов излучаемых сигналов и пространственную корреляцию между антеннами.
2. Разработана методика оценки помехоустойчивости MISO систем с множеством передающих и одной приемной антенной, на основе собственных чисел матрицы коэффициентов передачи канала, с учетом обобщенной корреляционной модели канала.
3. Разработан алгоритм приема сигналов OFDM с использованием обучающей последовательности в каналах с многолучевостью и конечной скоростью изменения параметров.
4. Разработана методика анализа помехоустойчивости синтезированного алгоритма разнесённого приёма сигналов OFDM с использованием обучающей последовательности в каналах с многолучевостью.
5. Разработаны компьютерные модели MISO-систем в среде MATLAB для случаев 2-х, 4-х, 8-ми передающих антенн, использующих методы квазиортогонального пространственно-временного кодирования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Фалько А.И., Носов В.И., Калачиков А.А., Тимощук Р.С., Гюнтер А.В. Применение шумоподобных сигналов с нулевой зоной корреляции в мобильных системах MIMO// Телекоммуникации. -2010. – №10. С.2-11.
2. Носов В.И., Тимощук Р.С. Повышение помехоустойчивости канала с использованием 2М-пространственно-временного кодирования//Вестник СибГУТИ. 2010. №1. С.3-12.
3. Тимощук Р.С., Носов В.И. Исследование пространственно-временной корреляционной модели для радиосистем с разносом передачи //Вестник СибГУТИ. 2012. №4. С.31-49.
4. Носов В.И., Тимощук Р.С., Дроздов Н.В. Моделирование систем связи в среде MatLab. –Новосибирск.: СибГУТИ. -2007. -177с.
5. Фалько А.И., Носов В.И., Калачиков А.А., Тимощук Р.С., Омуралиева С.С. Адаптивный разнесенный прием сигналов OFDM//Радиотехника.-2011.- №11. С.13-19
6. Тимощук Р.С., Носов В.И. Исследование вопросов помехоустойчивости в сетях радиодоступа// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2007. Том 1 – с.226

7. Тимощук Р.С., Носов В.И. Исследование адаптивных пространственно-временных методов повышения помехоустойчивости// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2008. Том 1 – с.361
8. Тимощук Р.С., Носов В.И. Исследование ортогональных пространственно-временных блочных кодов в схемах с разнесенной передачей сигнала// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2009. Том 1 – с.333
9. Тимощук Р.С., Носов В.И. Повышение помехоустойчивости канала с использованием 2М-Пространственно-временного кодирования// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2010. Том 1 – с.418
10. Тимощук Р.С., Носов В.И. Исследование методов пространственно-временного кодирования для повышения помехоустойчивости каналов радиосвязи// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2011. Том 1 – с.484
11. Тимощук Р.С. Разработка корреляционной модели канала связи для оценки помехоустойчивости MISO-систем// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2011. Том 1 – с. 483
12. Тимощук Р.С., Носов В.И. Использование методов пространственно-временного кодирования для повышения помехоустойчивости каналов радиосвязи// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2012. Том 1 – с. 129
13. Тимощук Р.С. Разработка корреляционной модели канала связи для оценки помехоустойчивости MIMO-систем// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2012. Том 1 – с. 131
14. Тимощук Р.С. Оценка влияния корреляции в системах радиосвязи с множественной передачей по технологии MISO// Информатика и проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2013. Том 1 – с. 135

Тимошук Роман Сергеевич

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 05.13
формат бумаги 60x84/16, отпечатано на ризографе, шрифт №10,
изд. л. 1,2 , заказ № 90, тираж 100. СибГУТИ
630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86