

На правах рукописи

Хазов Михаил Леонидович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
АЛГОРИТМОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ АНТЕНН
В СИСТЕМАХ СВЯЗИ МІМО**

Специальность 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2023

Диссертационная работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: Крейнделин Виталий Борисович – доктор технических наук, профессор.

Официальные
оппоненты: Вытовтов Константин Анатольевич - д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории № 69 «Управление сетевыми системами» федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук».

Варукина Лидия Александровна - к.т.н., директор по продукту ООО «КНС-Групп».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М. И. Кривошеева» (ФГБУ НИИР).

Защита состоится «31» января 2024 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при МТУСИ по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: <http://srd-mtuci.ru/images/Dis-Hazov/dis-Hazov.pdf>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

55.2.002.01, д.т.н, доцент

М. В. Терешонок

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Узким местом в организации связи между пользователями является пропускная способность радиоканала. Одним из способов увеличения пропускной способности радиоканала является расширение его полосы частот. Однако, ресурс радиочастотного спектра ограничен. Для запуска в эксплуатацию системы 5G операторское сообщество говорит о необходимости выделения минимальной суммарной полосы частот в 400 МГц, а с учетом диапазонов миллиметровых (верхнего) и дециметровых (нижнего) длин волн – порядка 5 ГГц.

При постоянном росте нагрузки на сети связи становится жизненно необходимым заметно повышать спектральную эффективность и помехоустойчивость системы связи, снижать потребность в дефицитном частотном ресурсе, снижать расходы на развертывание и эксплуатацию современных и перспективных систем связи, повышать пропускную способность и отказоустойчивость системы связи.

Системы связи со многими передающими и многими приемными антеннами (Multiple-Input-Multiple-Output, ММО) обеспечивают высокую спектральную эффективность благодаря пространственному мультиплексированию (уплотнению) сигналов и пространственному разнесению антенн, позволяют снизить коэффициент ошибок на бит (Bit Error Rate, BER). Однако, сложность системы и стоимость изготовления радиочастотных трактов заметно растет с увеличением количества активных антенн. Существенно снизить эти затраты при сохранении основных преимуществ многоантенных систем возможно, применяя подход, известный как переключение (автовыбор) антенн. Ограниченному числу радиочастотных трактов могут быть оптимально назначены приемные и/или передающие антенны. При этом используются антенные переключатели с потерями порядка 1,0 дБ. В то же время, помехоустойчивость системы связи ММО растет как с увеличением числа активных антенн (радиотрактов), так и с увеличением общего числа антенн (пассивных антенн).

Для практического применения технологии переключения антенн прежде всего необходимо определить алгоритм автовыбора антенн с низкой вычислительной сложностью и наилучшим критерием оптимальности для переключения антенн в условиях, приближенным к реальным, т.е. при наличии различного рода шумов, помех, искажений и замираний в канале связи. В работе разработаны и исследованы новый критерий оптимальности для автовыбора антенн и новые алгоритмы автовыбора антенн.

Степень разработанности темы. Изучением и вопросами применения технологии ММО, в том числе вопросами поиска алгоритмов переключения антенн с низкой вычислительной сложностью и наилучшим критерием оптимальности занимался ряд российских и зарубежных ученых, в их числе: М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, С. Bruno, А. Goldsmith, Е. Larsson.

Целью настоящей работы является разработка алгоритмов переключения (автовыбора) антенн для систем связи ММО, демонстрирующих при их использовании

по сравнению с известными алгоритмами более высокие либо сравнимые характеристики помехоустойчивости системы связи и обладающих приемлемой для практического применения вычислительной сложностью.

Решаемые задачи:

- Анализ характеристик известных алгоритмов переключения (автовыбора) антенн.
- Поиск, разработка и исследование нового критерия оптимальности для переключения (автовыбора) антенн.
- Разработка и исследование новых алгоритмов переключения (автовыбора) антенн с низкой вычислительной сложностью и незначительными энергетическими потерями в сравнении с лучшими алгоритмами.

Методология и методы научного исследования. Научное исследование, прежде всего, базировалось на использовании теории связи, имитационном компьютерном моделировании, теории алгоритмов, применялись методы оценки вычислительной сложности, использовался математический аппарат из теорий численных методов, а также линейной алгебры.

Теоретическая значимость работы:

- Посредством обоснования для вектора информационных символов связи суммы дисперсий ошибок оценивания с вероятностью ошибки аргументирован выбор лучшего критерия оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции. Снижение вероятности ошибки обеспечивает повышение качества и целостности передаваемой информации.
- Установлена высокая эффективность применения нового критерия оптимальности с различными алгоритмами переключения антенн по результатам сравнительной оценки характеристик помехоустойчивости системы связи с известными алгоритмами переключения антенн, выполненной методом статистического моделирования.

Объект исследований – система связи ММО с автовыбором антенн.

Предмет исследований – алгоритмы переключения (автовыбора) антенн в системах связи ММО.

Научная новизна работы:

- Для целей переключения антенн предложен и исследован вместе с алгоритмом полного перебора новый критерий оптимальности, основанный на минимуме следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции. При его использовании система связи ММО демонстрирует в исследованных конфигурациях и условиях до 1 дБ превосходящие характеристики помехоустойчивости. Значение вычислительной сложности нового критерия оптимальности ниже в 1,5 раза в сравнении с наилучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.
- Разработана упрощенная версия критерия в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции с вычислительной сложностью порядка 2,5 раз ниже в сравнении с наилучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.

– Разработаны новые квазиоптимальные алгоритмы, пошагово увеличивающие (PZF) или пошагово уменьшающие (IDZF) размерность формируемой матрицы канала, незначительно (до 0,5 дБ для PZF и до 1,2 дБ для IDZF) уступающие в помехоустойчивости оптимальному алгоритму с лучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности, при этом обладающие значительно более низкой вычислительной сложностью. Низкая вычислительная сложность квазиоптимального алгоритма PZF позволяет использовать его в реальных системах связи ММО с современными процессорами, включая отечественные образцы.

Практической ценностью работы является разработка новых алгоритмов переключения антенн, применение которых в системе связи ММО обеспечивает более высокие по сравнению с известными алгоритмами характеристики помехоустойчивости и приемлемую для использования в реальных многоантенных системах связи ММО вычислительную сложность, в том числе и в системах ММО высоких порядков.

Результаты работы были использованы в разработках российского научно-исследовательского института радио имени М.И. Кривошеева (ФГБУ НИИ Радио) в целях реализации автовыбора антенн и показали свою эффективность, позволив увеличить пропускную способность канала связи в условиях многолучевой среды распространения радиоволн без увеличения занимаемой полосы частот или мощности передатчика, также были использованы Санкт-Петербургским филиалом «Ленинградское отделение научно-исследовательского института радио» ФГБУ НИИ Радио в целях радиочастотного планирования сетей беспроводного доступа, в том числе в целях сокращения количества базовых станций для покрытия территорий фиксированной площади.

Научное исследование, прежде всего, базировалось на использовании теории связи, имитационном компьютерном моделировании, теории алгоритмов, осуществлялось с использованием методов оценки вычислительной сложности, математического аппарата из теорий численных методов, а также линейной алгебры.

Выносимые на защиту основные положения.

1. Новый критерий оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок оценивания или демодуляции позволяет при его использовании с алгоритмом полного перебора (оптимальным алгоритмом) получить в исследованных условиях выигрыш в помехоустойчивости системы связи ММО 0,5 – 1,0 дБ по сравнению с лучшим из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.

2. Оптимальный алгоритм полного перебора при использовании нового критерия оптимальности обеспечивает выигрыш в вычислительной сложности в 1,5 раза по сравнению с использованием лучшего из известных критериев оптимальности в виде максимума пропускной способности.

3. Низкая вычислительная сложность нового квазиоптимального алгоритма переключения (автовыбора) антенн позволяет применять его в реальных системах связи

ММО при незначительных потерях в помехоустойчивости системы связи – до 0,5 дБ в сравнении с лучшим из известных алгоритмов переключения антенн.

Достоверность. Результаты диссертационной работы достоверны, что подтверждается согласованностью результатов теоретического анализа и имитационного моделирования. Достоверность результатов также подтверждается актами об их внедрении и обсуждались со специалистами, в том числе на научных конференциях.

В опубликованные научные труды диссертантом **внесен основной вклад** в части разработки и исследования алгоритмов переключения антенн с лучшими характеристиками помехоустойчивости, разработаны квазиоптимальные алгоритмы с приемлемой для их практического использования вычислительной сложностью. Вклад соавторов ограничивался постановкой задач и обсуждением результатов. Полученные результаты обсуждались со специалистами на научных конференциях, в их числе, XIII международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества», Москва, 2019 г.; Международная научно-техническая конференция «Телекоммуникационные и вычислительные системы, Москва, 2022 г. В перечень ВАК Минобрнауки России вошли 4 работы с участием автора. Работы автора представлены на 6 конференциях. Всего опубликовано 10 работ.

Диссертация содержит введение, четыре раздела, заключение, список сокращений, список литературы, два приложения, 126 страниц текста, иллюстрируется 40 рисунками и 9 таблицами. Список литературы состоит из 114 наименований. Приложения содержат 3 страницы, в том числе акты, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертационных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные направления исследований.

В **первом разделе** рассматривается математическая модель системы ММО без переключения и с переключением (автовыбором) антенн, изложены существующие алгоритмы переключения антенн, проведен их анализ и обоснование нецелесообразности, а в ряде случаев и невозможности применения этих алгоритмов в системах ММО. Проведен анализ помехоустойчивости известных алгоритмов автовыбора антенн.

Рассмотрим систему ММО, в которой есть N передающих и M приемных антенн, P передающих радиотрактов и L приемных радиотрактов. В системе ММО без автовыбора антенн $P = N$, $L = M$ и ее модель описывается традиционным уравнением:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{\rho}{N}} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\eta}, \quad (1)$$

где \mathbf{y} – вектор-столбец комплексных отсчётов наблюдения размерности $M \times 1$; \mathbf{s} – вектор-столбец передаваемых QAM-символов размерности $N \times 1$; ρ – среднее ОСШ для каждой из приемных антенн, $\boldsymbol{\eta}$ – вектор комплексных отсчётов аддитивного белого гауссовского шума с единичной корреляционной матрицей и нулевым средним; \mathbf{H} – комплексная матрица канала MIMO, размерности $M \times N$, где элементы h_{ij} матрицы \mathbf{H} – комплексные коэффициенты передачи канала связи MIMO между i -й приемной антенной и j -й передающей антенной. Коэффициенты h_{ij} – комплексные гауссовские случайные величины с нулевыми средними и с единичными дисперсиями.

На практике существует пространственная корреляция между элементами матрицы \mathbf{H} – коэффициентами передачи h_{ij} . Для точного описания корреляции замираний может быть использована корреляционная матрица замираний \mathbf{V} размерности $MN \times MN$. Практическое применение полной матрицы \mathbf{V} представляется затруднительным. Для этих задач используется Модель Кронекера, которая имитирует и описывает пространственную корреляцию замираний.

В системе MIMO можно одновременно передать несколько потоков данных применив пространственно-временное кодирование и разнесение. С увеличением количества передающих и приемных антенн эффективность системы MIMO (спектральная; энергетическая) увеличивается. Каждый отдельный радиотракт подразумевает наличие дорогостоящих активных элементов (на передаче – высокоэффективный линейный усилитель; на приеме – малозумящий усилитель).

Необходимо найти компромисс между помехоустойчивостью и спектральной эффективностью, а также стоимостью, габаритами и энергопотреблением. Система MIMO с переключением антенн позволяет найти удовлетворительный компромисс.

Рассмотрим модель системы MIMO с переключением антенн одновременно на приемной и на передающей сторонах (Рис. 1).

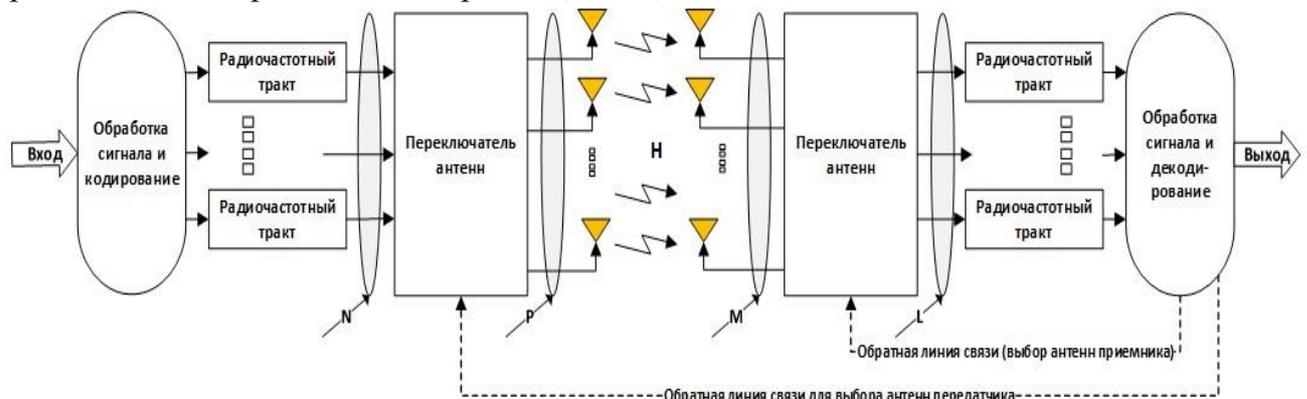


Рис. 2. Система MIMO с переключением антенн как на передаче, так и на приеме.

Выбирается $L < M$ антенн с номерами $i \in I$, где I – подмножество всех выбранных приемных антенн и выбирается $P < N$ антенн с номерами $j \in J$, образующими подмножество передающих антенн J .

В целях обеспечения автовыбора непосредственно в приемнике должна быть реализована обратная связь. Приемник также с помощью еще одного обратного канала связи с передатчиком, направляет команду о выборе антенн передатчику.

На интервале одного символа в приемник передается набор параметров в виде вектора информационных символов \mathbf{s}_j . Вектор принимаемых сигналов:

$$\tilde{\mathbf{y}}^I = \sqrt{\frac{\rho}{P}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}^{IJ} \cdot \tilde{\mathbf{s}}^J + \tilde{\boldsymbol{\eta}}^I, \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{y}}^I$ – это вектор принимаемых сигналов, размерности $L \times 1$, содержащий только те отсчеты полного вектора \mathbf{y} , номера которых принадлежат множеству I ; $\tilde{\mathbf{s}}^J$ – это вектор передаваемых QAM-символов, размерности $P \times 1$, содержащий только те символы, номера которых принадлежат множеству J ; ρ – это среднее ОСШ для каждой из приемных антенн; $\tilde{\boldsymbol{\eta}}^I$ – это вектор комплексных отсчетов гауссовского аддитивного белого шума размерности $L \times 1$; $\tilde{\mathbf{H}}^{IJ}$ – комплексная подматрица полной матрицы канала ММО \mathbf{H} , содержащая только те строки из полной матрицы, номера которых i принадлежат множеству I , а также одновременно только те столбцы из полной матрицы, номера которых j принадлежат множеству J .

Каждый из **алгоритмов переключения антенн** работает в связке с критерием оптимальности, используемым для автовыбора антенн. Оптимальным алгоритмом является алгоритм полного перебора, осуществляется перебор абсолютно всех комбинаций подматриц $\hat{\mathbf{H}}$ размерности $P \times L$ внутри матрицы \mathbf{H} – полной матрицы канала ММО размерности $N \times M$ и выбор целевой подматрицы $\hat{\mathbf{H}}$ с комбинацией передающих и приемных радиотрактов, показывающей наилучшие по заданному критерию оптимальности характеристики.

В Табл. 1. приведено количество всех возможных комбинаций антенн в системе ММО в зависимости от числа пассивных и активных антенн, где общее число пассивных передающих и приемных антенн $N = M$, число активных (выбираемых) передающих и приемных антенн (радиотрактов) $P = L$.

Табл. 1. Количество всех возможных комбинаций антенн в системах ММО.

$N = M$	8	12	16	32	48	64
$L = P$	4	6	8	16	24	32
$Q(N, M, L, P)$	$4,9 \cdot 10^3$	$8,53 \cdot 10^5$	$1,65 \cdot 10^8$	$3,61 \cdot 10^{17}$	$1,03 \cdot 10^{27}$	$3,35 \cdot 10^{36}$

Полный перебор (оптимальный алгоритм) на практике можно применять только для систем ММО малых размерностей (порядков). Перед научным сообществом поставлены задачи по разработке квазиоптимальных алгоритмов выбора антенн (алгоритмов неполного перебора) с низкой вычислительной сложностью и с наилучшими результатами при определении комбинации выбираемых антенн (зависит от критерия оптимальности), что является крайне необходимым для применения систем

ММО в практических целях в перспективных стандартах подвижной радиотелефонной связи.

Алгоритм полного перебора с критерием оптимальности в виде максимума нормы Фробениуса (максимума ОСШ), выражение для которого имеет вид:

$$\max_{\tilde{\mathbf{H}}} \|\tilde{\mathbf{H}}\|_F^2 = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^P |\tilde{h}_{mn}|^2. \quad (3)$$

Алгоритм полного перебора оптимальный по критерию автовыбора: максимум пропускной способности, выражение для которого:

$$C_{\max} = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} \log \det \left(\mathbf{1} + \frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \right). \quad (4)$$

К известным алгоритмам неполного перебора (квазиоптимальным) относятся алгоритм выбора антенн на основе оценки евклидовых норм столбцов и, затем норм строк матрицы канала ММО, известный в литературе как NSA (Norm Based Antenna selection) вместе с его модификацией IDNSA (Iterative Decremental Norm Based Antenna selection).

Работа алгоритма NSA состоит из двух укрупненных шагов. **Шаг 1.** Вычисление, сравнение и выбор максимальных значений евклидовых норм для столбцов матрицы \mathbf{H} . Среди всех $\mathbf{h}_j, j=1..N$ выбираются столбцы с максимальными евклидовыми нормами $\|\mathbf{h}_j\|$ и формируется подматрица $\hat{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{H}}^J$, размерность которой $M \times P$. **Шаг 2.** Вычисление, сравнение и выбор максимальных значений евклидовых норм всех строк подматрицы $\hat{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{H}}^J$. Среди $\mathbf{h}_i, i=1..M$ выбираются строки с максимальными евклидовыми нормами $\|\mathbf{h}_i\|$ и формируется целевая подматрица $\tilde{\mathbf{H}}$.

Работа алгоритма IDNSA заключается в итерационном понижении размерности полной матрицы канала. **Шаг 1.** Выбирается один столбец, для которого евклидова норма минимальна. Этот столбец исключается из дальнейших вычислений. Матрица \mathbf{H} преобразуется в матрицу $\hat{\mathbf{H}}^{(1)}$ размерности $M \times (N-1)$. **Шаг 2.** Вычисляются евклидовые нормы всех строк новой матрицы $\hat{\mathbf{H}}^{(1)}$, выбирается одна строка с минимальной евклидовой нормой. Выбранная строка исключается из дальнейших вычислений. Матрица $\hat{\mathbf{H}}^{(1)}$ преобразуется в матрицу $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$ размерности $(M-1) \times (N-1)$. Повторяем последовательное итерационное исключение одного столбца и одной строки с минимальной евклидовой нормой из преобразованной матрицы канала, до преобразования матрицы \mathbf{H} в целевую матрицу $\tilde{\mathbf{H}}$ с целевой размерностью $L \times P$.

Характеристики работы алгоритмов сравнивались с использованием метода статистического моделирования посредством оценки помехоустойчивости системы ММО на уровнях $BER = 10^{-3}$ и $BER = 10^{-4}$, а также $FER = 10^{-2}$.

Моделирование проводилось при следующих условиях: метод модуляции – 64-QAM, демодуляции – MMSE; вид помехоустойчивого кодирования - турбокодирование (скорость – 1/2, число итераций декодирования – 4); исследуемые алгоритмы: оптимальный с критерием в виде максимума пропускной способности (4); оптимальный с критерием в виде максимума нормы Фробениуса (3); квазиоптимальные с критерием в виде максимума евклидовой нормы (NSA, IDNSA); случайного выбора; матрица канала \mathbf{H} точно известна на приемной стороне; вид замираний – некоррелированные релейевские; длина кадра – 573 бита: число экспериментов - более 100000.

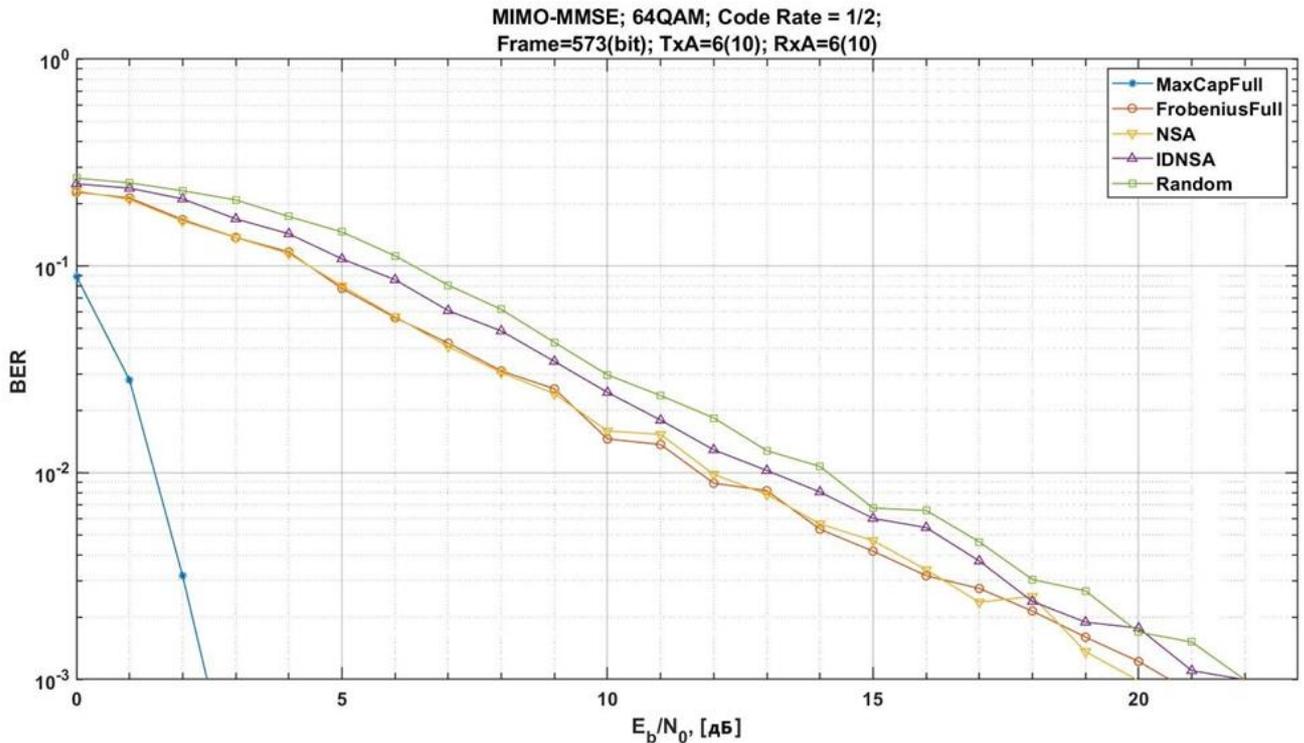


Рис. 3. Помехоустойчивость известных алгоритмов переключения антенн, использующих известные критерии оптимальности.

Из Рис. 3 очевидно, что наилучшие характеристики помехоустойчивости демонстрирует система MIMO с оптимальным алгоритмом и критерием в виде максимума пропускной способности (4). Критерий максимума ОСШ (3) демонстрирует относительно низкую эффективность, поскольку он не учитывает информацию о значении ОСШ.

Оценим вычислительную сложность известных алгоритмов. Выполним подсчет необходимого количества выполняемых процессором арифметических операций, чтобы реализовать известные оптимальные алгоритмы полного перебора (3), (4) и известные квазиоптимальные алгоритмы (NSA, IDNSA) при $M = N$ и $L = P$.

Обозначим общую вычислительную сложность в виде греческой буквы ню ν :

$$\begin{aligned} \nu_{\Sigma}^{yMH} &= Q \cdot \nu_n^{yMH} \\ \nu_{\Sigma}^{cL} &= Q \cdot \nu_n^{cL} + Q \end{aligned} \quad (5)$$

где Q – количество всех возможных комбинаций для выбранной конфигурации пассивных и активных антенн, а V_n – общее число арифметических операций, необходимых для реализации одной комбинации. К таким операциям относятся операции действительного сложения и операции действительного умножения.

Всего требуется операций для алгоритма полного перебора с критерием (3):

$$\begin{aligned} v_{frob}^{умн} &= Q \cdot 2 \cdot (P-1) \cdot (L-1) \\ v_{frob}^{сл} &= Q \cdot (P-1) \cdot L + Q \end{aligned} \quad (6)$$

Всего требуется операций для алгоритма полного перебора с критерием (4):

$$\begin{aligned} v_{\max CapFull}^{умн} &= Q \cdot \left[4 \cdot P \frac{L^2}{2} + 4 \cdot \left(\frac{2}{3} L^3 + L^2 + \frac{1}{3} L - 2 \right) \right] \\ v_{\max CapFull}^{сл} &= Q \cdot \left[(P-1) \cdot L^2 + L + 4 \cdot \left(\frac{2}{3} L^3 + L^2 + \frac{1}{3} L - 2 \right) \right] + Q \end{aligned} \quad (7)$$

Оценка вычислительной сложности квазиоптимального алгоритма IDNSA:

$$V_{IDNSA}^{умн} = \frac{2 \cdot P \cdot M + 2 \cdot P \cdot (M-L+1)}{2} \cdot (M-L) \quad (8)$$

$$V_{IDNSA}^{сл} = \frac{P \cdot M + M + P \cdot (M-L+1) + (M-L+1)}{2} \cdot (M-L) \quad (9)$$

Оценка вычислительной сложности квазиоптимального алгоритма NSA:

$$\begin{aligned} v_{NSA}^{умн} &= P \cdot M + L \cdot N \\ v_{NSA}^{сл} &= P \cdot M + M + L \cdot N + N \end{aligned} \quad (10)$$

Актуальной является задача снижения вычислительной сложности алгоритмов выбора в системе с большим количеством антенн, в равной степени, как и поиск критерия оптимальности, использование которого дает заметный выигрыш в помехоустойчивости и повышает качество работы самого алгоритма.

Во **втором разделе** представлен новый критерий оптимальности $tr(\mathbf{R})$ (**минимум следа корреляционной матрицы ошибок оценивания**) и проведен анализ улучшения характеристик систем ММО при использовании этого критерия в алгоритмах полного перебора. В этом разделе также продемонстрирована возможность упрощения вычисления самого критерия оптимальности и проанализирован эффект от такого упрощения.

К выбору нового критерия оптимальности подтолкнуло понимание важности обеспечения качества и целостности передаваемой информации, для чего, как известно, необходимо минимизировать вероятность ошибки. На практике для систем ММО получить аналитические выражения для определения вероятности ошибки затруднительно, либо эти выражения становятся слишком сложными. Известные же критерии оптимальности для выбора антенн напрямую не направлены на минимизацию

вероятности ошибки в системах ММО. Здравый смысл подсказывает, что в целях достижения лучших характеристик для задачи выбора антенн в ММО нужно использовать критерий, непосредственно связанный с минимумом вероятности ошибки. Очевидно, чем меньше дисперсия ошибки оценивания, тем ниже вероятность ошибки.

Для снижения общей вероятности ошибки достаточно минимизировать сумму дисперсий ошибок оценивания для вектора информационных символов. Дисперсия ошибок оценивания для информационного символа i находится на главной диагонали корреляционной матрицы ошибок оценивания \mathbf{R} . Остальными элементами матрицы \mathbf{R} являются коэффициенты корреляции.

Оценку вектора информационных символов $\hat{\mathbf{S}}$ в соответствии с моделью принимаемого сигнала (2) можно выполнить используя известное выражение для алгоритма с критерием декорреляции Zero forcing: $\hat{\mathbf{S}} = 2\sigma_n^2 (\tilde{\mathbf{H}}'\tilde{\mathbf{H}})^{-1} \tilde{\mathbf{H}}'\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{R}\tilde{\mathbf{H}}'\tilde{\mathbf{y}}$. Оценку корреляционной матрицы ошибок оценивания \mathbf{R} при использовании линейного демодулятора можно выполнить, используя выражение:

$$\mathbf{R} = 2\sigma_n^2 (\tilde{\mathbf{H}}'\tilde{\mathbf{H}})^{-1}, \quad (11)$$

Средняя вероятность ошибки на выходе демодулятора непосредственно зависит от суммы значений элементов главной диагонали матрицы \mathbf{R} или от суммарной дисперсии ошибок оценивания. В качестве критерия оптимальности для выбора антенн в системе ММО целесообразно попробовать взять минимум суммы дисперсий ошибок оценивания (демодуляции), что представляет собой след $tr(\mathbf{R})$ матрицы \mathbf{R} :

$$\min_{\mathbf{H}} tr(\mathbf{R}) = 2\sigma_n^2 \min_{\mathbf{H}} tr(\tilde{\mathbf{H}}'\tilde{\mathbf{H}})^{-1}, \quad (12)$$

Выполнена оценка эффективности оптимальных алгоритмов, использующих новый критерий оптимальности (12) и лучший из известных – критерий в виде максимума пропускной способности (4). Моделирование проводилось при схожих, описанных ранее в первом разделе общих условиях.

Использование нового критерия автовыбора антенн (12) с оптимальным алгоритмом позволяет получить одинаковый выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с лучшим из известных алгоритмов – оптимальным алгоритмом с критерием максимума пропускной способности (4) независимо от того на какой из сторон осуществляется переключение антенн (отдельно на приемной, отдельно на передающей или одновременно на приемной и передающей). Вместе с тем, значение BER 10^{-3} достигается при большем уровне ОСШ для случаев переключения антенн только на одной из сторон (дополнительно, + 3 дБ при выборе 4 из 10 антенн).

Оптимальный алгоритм с новым критерием (12) требует выполнения операций:

$$\begin{aligned} V_{MinTrVzf}^{ymh} &= Q \cdot 4 \cdot P^3 \\ V_{MinTrVzf}^{cl} &= Q \cdot (3 \cdot (P^3 - P^2 + P) - 1) + Q \end{aligned} \quad (13)$$

Представим вариант упрощенного вычисления нового критерия (12).

$$\mathbf{R} = 2\sigma_{\eta}^2 (\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}})^{-1} = 2\sigma_{\eta}^2 \mathbf{T}^{-1}, \quad (14)$$

где $\mathbf{T} = \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}$; $2\sigma_{\eta}^2$ - дисперсия шума наблюдения в одной антенне на стороне приемника. Известен ряд Неймана:

$$(\mathbf{1} - \mathbf{X})^{-1} = \sum_{s=0}^{\infty} \mathbf{X}^s, \quad (15)$$

где \mathbf{X} - это некоторая матрица. Для упрощения вычисления $tr(\mathbf{R})$ возможно приближенно вычислить значение \mathbf{T}^{-1} с помощью ряда Неймана, ограничившись его членами нулевого и первого порядков. Член ряда Неймана второго порядка также целесообразно учитывать после некоторого упрощения. Обозначим $(\mathbf{1} - \mathbf{X}) = \mathbf{Z}$, тогда $\mathbf{X} = \mathbf{1} - \mathbf{Z}$. Перепишем выражение (15) относительно \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z}^{-1} = \sum_{s=0}^{\infty} (\mathbf{1} - \mathbf{Z})^s. \quad (16)$$

Возьмем диагональную матрицу \mathbf{K} , у которой кроме элементов главной диагонали, все остальные элементы нулевые. На главной диагонали матрицы \mathbf{K} лежат диагональные элементы матрицы \mathbf{T} , то есть $\mathbf{K} = diag(\mathbf{T})$. При умножении слева или справа матрицы \mathbf{T} на \mathbf{K}^{-1} результирующая матрица будет иметь на главной диагонали единицы. Пусть таким произведением будет матрица \mathbf{Z} . Таким образом, $\mathbf{Z} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T}$, следовательно $\mathbf{T} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{Z}$, при этом:

$$\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1}. \quad (17)$$

Перепишем выражение (16):

$$\mathbf{Z}^{-1} = \sum_{s=0}^{\infty} (\mathbf{1} - \mathbf{Z})^s = \sum_{s=0}^{\infty} (\mathbf{1} - \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T})^s. \quad (18)$$

Запишем выражение (18) только для членов ряда Неймана нулевого, первого и второго порядков:

$$\mathbf{Z}^{-1} \approx \mathbf{2} \cdot \mathbf{1} - \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T} + (\mathbf{1} - \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T}) \cdot (\mathbf{1} - \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T}). \quad (19)$$

Учитывая выражения (17), (19), запишем выражение для матрицы \mathbf{T}^{-1} :

$$\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{Z}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1} \approx \mathbf{3} \cdot \mathbf{K}^{-1} - \mathbf{3} \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{K}^{-1} + \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{K}^{-1}. \quad (20)$$

Представление (20) оказывается достаточно точным. В то же время, его вычислительная сложность относительно высокая из-за наличия произведения $\mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{K}^{-1}$. Его вычисление необходимо несколько упростить. Произведем замену первого множителя этого произведения – матрицы \mathbf{K}^{-1} – на число α (альфа), вычисленное как среднее значение всех диагональных элементов матрицы \mathbf{K}^{-1} . После чего, в произведении $\alpha \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{K}^{-1}$ для вычисления матрицы $\mathbf{T} = \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}$ предлагается учитывать только часть наибольших по модулю элементов матрицы $\tilde{\mathbf{H}}$. Оставшиеся элементы пусть будут равными нулю. Таким образом, предлагается вычислять произведения усеченных матриц.

Выражение для вычисления упрощенного критерия оптимальности:

$$\min tr(\hat{\mathbf{R}}) = \min tr \left[3 \cdot \mathbf{K}^{-1} - 3 \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{K}^{-1} + \alpha \cdot \mathbf{T}_{trunc} \cdot \mathbf{K}_{trunc}^{-1} \cdot \mathbf{T}_{trunc} \cdot \mathbf{K}_{trunc}^{-1} \right]. \quad (21)$$

При использовании оптимального алгоритма с упрощенным критерием в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции, без обращения матрицы (21) помехоустойчивость системы связи ММО на 4 дБ превосходит оптимальный алгоритм с критерием в виде максимума нормы Фробениуса (3).

В третьем разделе в условиях отсутствия и наличия пространственной корреляции замираний выполнен анализ характеристик новых квазиоптимальных алгоритмов переключения антенн, использующих новый критерий (12).

Новый алгоритм № 1 - алгоритм ПZF основан на итерационном увеличении количества выбираемых антенн, вплоть до необходимого количества и использует новый критерий оптимальности (12) для автовыбора антенн.

Для наглядности возьмем систему ММО размерности $N = M$, где необходимо выбрать одинаковое количество антенн на передающей и приемной сторонах и это количество, в принятых в работе обозначениях, $P = L$.

Начальные условия работы алгоритма. Одинаковое количество антенн на приеме и на передаче, формируемая нами матрица $\hat{\mathbf{H}}^{(0)} = []$, т.е. это пустая, не содержащая никаких элементов, матрица размерности 0×0 .

Шаг за шагом будем увеличивать размерность начальной матрицы, пока не будет сформирована требуемая подматрица $\hat{\mathbf{H}}^{(k)}$, размерности $L \times P$.

На каждом из последующих шагов формируется квадратная матрица $\hat{\mathbf{H}}^{(k)}$, k -го порядка. Количество шагов $k = 0 \dots P = 0 \dots L$.

На первом шаге, из полной матрицы канала \mathbf{H} выбираем максимальный по модулю элемент $h_{i(1)\hat{j}(1)}$, иными словами, будет выбрана пара антенн на передаче и приеме с максимальным коэффициентом передачи. Элемент формирует матрицу $\hat{\mathbf{H}}^{(1)}$, размерности 1×1 .

На втором шаге последовательно из полной матрицы выбираются и перебираются подматрицы $\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}$ размерности 2×2 , которые содержат в себе выбранный на первом шаге элемент $h_{i(1)\hat{j}(1)}$. Целевая подматрица $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$ находится из полной матрицы канала \mathbf{H} посредством перебора всех существующих комбинаций подматриц второго порядка $\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}$, каждая из которых содержит элемент $h_{i(1)\hat{j}(1)}$ и окаймляющий его элемент $h_{i(2)\hat{j}(2)}$, пока не будет определен элемент $h_{i(2)\hat{j}(2)}$, удовлетворяющий заданному условию выбора для подматрицы $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$. Условие выбора подматрицы представлено ниже.

$$\{\hat{i}(2)\hat{j}(2)\} = \arg \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i \neq \hat{i}(1)}} \min_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j \neq \hat{j}(1)}} f(\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}), \quad (22)$$

где $f(\tilde{\mathbf{H}}^{(2)})$ - это след корреляционной матрицы ошибок оценивания $\tilde{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(2)}$, определяемый по формуле:

$$f(\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}) = \text{tr}(\tilde{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(2)}) = 2\sigma_{\eta}^2 \text{tr} \left[\left(\tilde{\mathbf{H}}' \tilde{\mathbf{H}} \right)^{-1} \right], \quad (23)$$

В результате описанных выше действий будет выбрана еще одна передающая и приемная антенны с использованием нового критерия оптимальности и сформирована

матрица $\hat{\mathbf{H}}^{(2)} = \begin{bmatrix} h_{i(1)\hat{j}(1)} & h_{i(1)\hat{j}(2)} \\ h_{i(2)\hat{j}(1)} & h_{i(2)\hat{j}(2)} \end{bmatrix}$.

Условие выбора элемента матрицы \mathbf{H} на шаге n следующее:

$$\{\hat{i}(n)\hat{j}(n)\} = \arg \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i \neq \hat{i}(1) \\ \dots \\ i \neq \hat{i}(n-1)}} \min_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j \neq \hat{j}(1) \\ \dots \\ j \neq \hat{j}(n-1)}} f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)}), \quad (24)$$

где $f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)})$ - это след корреляционной матрицы $\tilde{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(n)}$, определяемый по формуле:

$$f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)}) = \text{tr}(\tilde{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(n)}) = 2\sigma_{\eta}^2 \text{tr} \left[\left(\tilde{\mathbf{H}}' \tilde{\mathbf{H}} \right)^{-1} \right]. \quad (25)$$

После перебора всех возможных комбинаций, работа алгоритма № 1 - алгоритма PZF (или PIMMSE) с использованием нового критерия оптимальности (12) будет завершена и будет сформирована целевая матрица.

Новый алгоритм № 2 - алгоритм IDZF основан на итерационном уменьшении количества антенн из всех возможных, вплоть до заданных значений и использует новый критерий оптимальности для автовыбора антенн (12).

Как и ранее будем исследовать систему MIMO размерности $N = M$, и $P = L$.

Начальные условия работы алгоритма. Одинаковое количество антенн на приеме и на передаче, формируемая нами матрица $\hat{\mathbf{H}}^{(0)} = \mathbf{H}$, т.е. это полная матрица канала размерности $N \times M$.

Шаг за шагом будем уменьшать размерность начальной матрицы, пока не будет сформирована требуемая подматрица $\hat{\mathbf{H}}^{(k)}$ размерности $L \times P$.

Таким образом, на каждом из последующем шаге формируется квадратная матрица $\hat{\mathbf{H}}^{(k)}$, k -го порядка.

Пусть $i(1)$ и $j(1)$ - текущие номера строк и столбцов, соответственно. Для матрицы $\hat{\mathbf{H}}^{(0)} = \mathbf{H}$, $1 \leq i(1) \leq (M = N)$, $1 \leq j(1) \leq (N = M)$. Обозначим $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}(i(1), j(1))$ - матрицу $\hat{\mathbf{H}}^{(0)}$, у которой исключены строка $i(1)$ и столбец $j(1)$.

Первый шаг работы алгоритма заключается в поиске строки $i(1)$ и столбца $j(1)$, при исключении которых для оставшихся строк и столбцов, т.е. для сформированной матрицы $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}(i(1), j(1))$, выполняется условие:

$$\{\hat{i}(1)\hat{j}(1)\} = \arg \min_{1 \leq i \leq M} \min_{1 \leq j \leq N} f(\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}[i(1), j(1)]), \quad (26)$$

где $f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)})$ - это след обратной корреляционной матрицы ошибок оценивания $\tilde{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(n)}$ (25).

Результатом работы алгоритма № 2 на первом шаге является матрица $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}(\hat{i}(1), \hat{j}(1)) = \hat{\tilde{\mathbf{H}}}^{(1)}$ размерности $(M-1) \times (M-1)$.

На втором шаге перебираем матрицы $\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}(i(2), j(2))$, которые являются матрицей $\hat{\tilde{\mathbf{H}}}^{(1)}$ с исключенными строкой $i(2)$ и столбцом $j(2)$. Условием для выбора матрицы $\hat{\tilde{\mathbf{H}}}^{(2)}$ является:

$$\{\hat{i}(2)\hat{j}(2)\} = \arg \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i(2) \neq i(1)}} \min_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j(2) \neq j(1)}} f(\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}[i(2), j(2)]), \quad (27)$$

где $f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)})$ - след обратной корреляционной матрицы ошибок оценивания $\tilde{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(n)}$ (25).

Результатом работы алгоритма № 2 на втором шаге является матрица $\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}(\hat{i}(2), \hat{j}(2)) = \hat{\tilde{\mathbf{H}}}^{(2)}$ размерности $(M-2) \times (M-2)$.

На шаге n перебираем матрицы $\tilde{\mathbf{H}}^{(n)}(i(n), j(n))$, которые являются матрицей $\hat{\tilde{\mathbf{H}}}^{(n-1)}$ с исключенными строкой $i(n)$ и столбцом $j(n)$. Условием для выбора матрицы $\hat{\tilde{\mathbf{H}}}^{(n)}$ является:

$$\{\hat{i}(n)\hat{j}(n)\} = \arg \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i(n) \neq i(1) \\ \dots \\ i(n) \neq i(n-1)}} \min_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j(n) \neq j(1) \\ \dots \\ j(n) \neq j(n-1)}} f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)}[i(n), j(n)]), \quad (28)$$

где $f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)})$ - след обратной корреляционной матрицы ошибок оценивания $\tilde{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(n)}$, см. формулу (25).

Результатом работы алгоритма № 2 - алгоритма IDZF или IDMMSE на шаге n является матрица $\tilde{\mathbf{H}}^{(n)}(\hat{i}(n), \hat{j}(n)) = \hat{\tilde{\mathbf{H}}}^{(n)}$, размерности $(M-n) \times (M-n)$, где $1 \leq n \leq M-L$, а $L=P$ - количество выбираемых антенн на передаче и приеме.

В целях сравнительного анализа характеристик помехоустойчивости системы ММО при использовании известных и предлагаемых алгоритмов в условиях отсутствия пространственной корреляции замираний моделирование проводилось для конфигураций выбираемого и общего количества антенн, одинакового на приемной и передающей сторонах (для 4 из 8; для 4 из 12 и для 10 из 14).

Для конфигурации 4x4 классического канала ММО без автовыбора антенн показатель ОСШ на уровне $BER=10^{-3}$ составляет 25,7 дБ. Для конфигурации 10x10 классического канала ММО без автовыбора антенн то же отношение 17,1 дБ.

Для конфигурации системы ММО 4x8 в условиях отсутствия пространственной корреляции замираний использование нового критерия автовыбора антенн (12) с оптимальным алгоритмом позволяет получить выигрыш в помехоустойчивости в 0,5 дБ

при значении $BER = 10^{-3}$ и $FER = 10^{-2}$, а при значении $BER = 10^{-4}$ выигрыш 0,6 дБ по сравнению с лучшим из известных алгоритмов - оптимальным алгоритмом с критерием максимума пропускной способности (4). В то же время, использование нового критерия автовыбора антенн (12) с оптимальным алгоритмом при значении $BER = 10^{-3}$ дает выигрыш порядка 18,3 дБ по сравнению с оптимальным алгоритмом с критерием нормы Фробениуса (3) и порядка 23 дБ по сравнению с классической системой MIMO без переключения антенн в конфигурации 4x4. Минимальный выигрыш от использования критерия (12) для конфигурации MIMO 10x14 составляет 0,75 дБ при значении $BER = 10^{-3}$ и 1 дБ при значении $BER = 10^{-4}$. Характеристики помехоустойчивости при использовании нового критерия оптимальности улучшаются с увеличением количества антенн.

На Рис. 4 показаны результаты моделирования кривых помехоустойчивости для оптимальных алгоритмов с известными критериями оптимальности (3), (4), одновременно показаны кривые помехоустойчивости известных квазиоптимальных алгоритмов (NSA, IDNSA) и новых квазиоптимальных алгоритмов (24), (28) в условиях отсутствия пространственной корреляции замираний для MIMO в конфигурации 4x8.

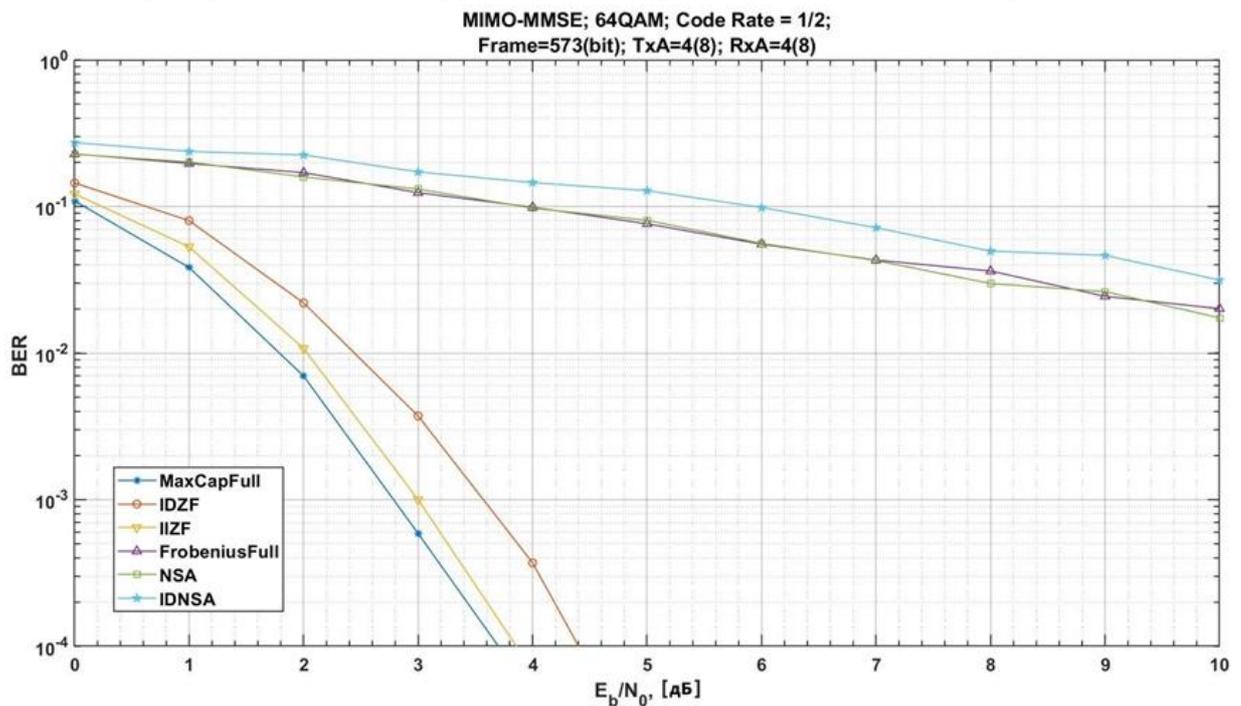


Рис. 4. Помехоустойчивость системы MIMO 4x8 для квазиоптимальных и известных оптимальных алгоритмов.

Из квазиоптимальных алгоритмов (Рис. 4) наилучшие результаты независимо от антенной конфигурации обеспечивают алгоритмы с критерием минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции (12), заметно превосходя характеристики оптимального алгоритма с критерием максимума ОСШ (3). Новый квазиоптимальный алгоритм пошагово увеличивающий размерность формируемой матрицы канала IIZF, незначительно, порядка 0,2 – 0,5 дБ, уступает оптимальному алгоритму с лучшим из известных критериев максимума пропускной способности (4).

При этом, как показано в разделе 4, алгоритм IZF обладает существенно меньшей вычислительной сложностью. Новый алгоритм неполного перебора IDZF с новым критерием минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции (12) уступает 0,6 – 1,2 дБ относительно нового квазиоптимального алгоритма IZF, пошагово увеличивающего размерность формируемой матрицы канала, при этом, как будет показано в разделе 4, обладает более высокой вычислительной сложностью.

Квазиоптимальные алгоритмы NSA, IDNSA демонстрируют низкую эффективность, уступая наиболее худшему из оцениваемых оптимальному алгоритму с критерием максимума ОСШ (3) и значительно уступая по характеристикам новым квазиоптимальным алгоритмам (24), (28).

С увеличением количества передающих и приемных антенн при сохранении количества передающих и приемных радиотрактов характеристики помехоустойчивости системы заметно улучшаются.

В реальных системах беспроводной связи существует пространственная корреляция замираний сигналов в различных антеннах, обусловленная близким расположением антенн.

Связь между матрицей некоррелированного релейского канала и матрицей коррелированного канала связи описывается следующим отношением:

$$vec(\mathbf{H}) = \mathbf{R}^{1/2} \cdot vec(\mathbf{H}_w), \quad (29)$$

где $vec(\mathbf{H})$ - операция преобразования матрицы (в нашем случае размерности $M \times N$) в вектор-столбец (размерности $M \times N \times 1$); \mathbf{H}_w - матрица некоррелированного релейского канала, состоящая из комплексных некоррелированных гауссовских случайных величин h_{ij} с нулевыми средними и одинаковыми дисперсиями; \mathbf{H} - матрица коррелированного канала той же размерности, что и \mathbf{H}_w ; \mathbf{R} - корреляционная матрица размерности $M \cdot N \times M \cdot N$.

Матрица \mathbf{R} имеет очень высокую размерность, в связи с чем выражение (29) редко применяется для моделирования. На практике используют упрощенную вариацию указанной модели - модель Кронекера, которая описывается следующим выражением:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \cdot \mathbf{H}_w \cdot \mathbf{R}_t^{1/2}, \quad (30)$$

где матрицы \mathbf{R}_r и \mathbf{R}_t определяют корреляцию между строками и столбцами матрицы \mathbf{H} и служат моделью корреляции между сигналами приемных и передающих антенн. Это положительно определенные эрмитовы матрицы, у которых элементы главной диагонали равны единице. Коэффициенты корреляции, входящие в состав матриц \mathbf{R}_r и \mathbf{R}_t в (30) могут быть получены путем либо аналитических расчетов или путем натуральных измерений. При относительно небольших коэффициентах корреляции эти корреляционные матрицы становятся трехдиагональными.

В Табл. 2 представлена сводная информация по энергетическому выигрышу в сравнении со значениями отношения сигнал шум на уровне коэффициента BER, равном 10^{-3} , взятыми для оптимального алгоритма с лучшим из известных критериев

оптимальности (4). Выигрыш оценивался при использовании оптимального алгоритма с новым критерием оптимальности (12) и двух новых квазиоптимальных алгоритмов с новым критерием оптимальности (12) в условиях наличия пространственной корреляции замираний на основе модели Кронекера при одной и той же конфигурации системы ММО 4x8 и при разных значениях коэффициентов корреляции на приеме ρ_r или на передаче ρ_t .

Табл. 2. Сводная оценка энергетического выигрыша при использовании оптимального алгоритма и двух новых квазиоптимальных алгоритмов с новым критерием оптимальности (12) в условиях наличия пространственной корреляции замираний в сравнении со значениями ОСШ, взятыми для оптимального алгоритма с лучшим из известных критериев оптимальности (4) на уровне 10^{-3} по BER.

ρ_r	0	0	0	0	0	0,3	-0,3	0,6	-0,6	0,3	0,6	-0,3	0,6	-0,6	-0,6
ρ_t	0	0,3	-0,3	0,6	-0,6	0	0	0	0	0,3	0,6	0,3	0,3	0,3	0,6
E_b / N_o MaxCapFull BER= 10^{-3}	3,7	3,1	3,05	3,95	4,05	3,05	3,2	4,05	4,05	3,5	5,4	3,45	4,25	4,35	5,3
$\Delta_{MinTrVzf}$	-0,6	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6	-0,65	-0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-0,75	-0,7	-0,8
Δ_{IDMMSE}	0,2	0,3	0,3	0,2	0,45	0,25	0,25	0,25	0,25	0,2	0,4	0,3	0,55	0,35	0,5
Δ_{IMMSE}	0,7	1,0	0,9	1,2	1,05	0,85	0,65	1,05	1,0	0,8	1,2	0,75	1,2	1,0	1,4

Для оценки вычислительной сложности новых алгоритмов неполного перебора PZF (24) (основан на пошаговом увеличении количества выбираемых антенн, вплоть до заданных значений) и IDZF (28) (основан на пошаговом уменьшении количества выбираемых антенн, вплоть до заданных значений) с новым критерием - минимум следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции (12) (MinTrVzf) необходимо повторить логику работы этих алгоритмов, оценивая вычислительную сложность на каждом шаге.

Вычислительная сложность на всех шагах работы алгоритма PZF:

$$\begin{aligned}
 v_{PZF}^{yMH} &= \sum_{n=1}^L \left[(N-n+1)^2 \cdot \left[2 \cdot n^3 + (4 \cdot n + 1) \cdot \frac{n^2}{2} \right] \right], \\
 v_{PZF}^{cI} &= \sum_{n=1}^L \left[(N-n+1)^2 \cdot \left[2 \cdot n^3 + (4 \cdot n - 4) \cdot \frac{n^2}{2} + n - 1 \right] \right].
 \end{aligned} \tag{31}$$

Вычислительная сложность на всех шагах работы алгоритма IDZF:

$$\begin{aligned}
 v_{IDZF}^{yMH} &= \sum_{n=1}^{N-L} \left[\left[2 \cdot (N-n)^3 + (4 \cdot (N-n) + 1) \cdot \frac{(N-n)^2}{2} \right] \cdot (N-n+1)^2 \right], \\
 v_{IDZF}^{cI} &= \sum_{n=1}^{N-L} \left[\left[2 \cdot (N-n)^3 + (4 \cdot (N-n) - 4) \cdot \frac{(N-n)^2}{2} + (N-n) - 1 \right] \cdot (N-n+1)^2 \right].
 \end{aligned} \tag{32}$$

Оптимальный алгоритм с новым критерием (12) демонстрирует выигрыш в 0,8 дБ в условиях наличия пространственных корреляций замираний, для MIMO низкой размерности 4×8 и при значениях коэффициентов корреляции $\rho_r = -0,6$, $\rho_t = 0,6$. Характеристики помехоустойчивости при использовании нового критерия оптимальности MinTrVzf (12) улучшаются с ростом количества активных и пассивных антенн. С усилением пространственной корреляции выигрыш в помехоустойчивости при использовании в виде критерия оптимальности нового критерия MinTrVzf (12) также растет в сравнении использованием критерия MaxCapFull (4) при одних и тех же коэффициентах корреляции.

Снижение помехоустойчивости системы MIMO в случае применения квазиоптимальных алгоритмов можно компенсировать выбором лучшего критерия оптимальности, т.е. критерия, по которому обычно осуществляется выбор радиотрактов. Новые квазиоптимальные алгоритмы IZF (24), IDZF (28) демонстрируют характеристики помехоустойчивости, сопоставимые с характеристиками лучших оптимальных алгоритмов MinTrVzf (12) и MaxCapFull (4).

В четвертом разделе выполнена комплексная оценка вычислительной сложности всех представленных в работе алгоритмов переключения антенн. Обоснована возможность практического применения алгоритмов переключения антенн в современных системах связи. В то же время, проанализированы величины и влияние на характеристики помехоустойчивости энергетических потерь в антенных переключателях, используемых для формирования радиотрактов. Предложены рекомендации по использованию переключателей и частотных диапазонов для получения максимальных энергетических преимуществ в системах MIMO с автовыбором (переключением) антенн.

Ниже в Табл. 3 приведены результаты оценки вычислительной сложности для оптимальных алгоритмов с известными Frob (3), MaxCapFull (4) и новым критерием оптимальности MinTrVzf (12), а также для упрощенных алгоритмов неполного перебора с известными (NSA, IDNSA) и новым критерием оптимальности IZF (24), IDZF (28). Оценки приведены, в том числе, и для системы MIMO высокого порядка с количеством пассивных антенн, равным 64.

Табл. 3. Результаты оценки вычислительной сложности для различных алгоритмов автовыбора антенн в системе MIMO.

Всего операций действительного умножения и действительного сложения									
Трак- тов	Ан- тенн	MaxCap Full	MinTrV zf	MinTrV zf_no_inv	IDZF	IZF	Frob	IDNSA	NSA
4	12	$1,6 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$	$7,1 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^6$	$6,9 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^2$
8	12	$1,2 \cdot 10^9$	$8,4 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^7$	$8,5 \cdot 10^2$	$4,1 \cdot 10^2$
4	10	$2,8 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^6$	$6,6 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^2$
8	10	$9,6 \cdot 10^6$	$6,9 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10^2$
4	8	$3,2 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^2$

Данные в Табл. 3 демонстрируют возможность практического применения нового алгоритма неполного перебора ПZF (24).

Производительность современных микропроцессоров составляет десятки и сотни ГФлопс (FLOPS, количество операций с плавающей запятой в секунду). В Табл. 4 показана оценка времени, требуемого процессорам Эльбрус и Qualcomm для поиска лучшей комбинации передающих и приемных радиотрактов при использовании нового алгоритма неполного перебора ПZF (24).

Табл. 4. Время, требуемое процессору для поиска лучшей комбинации передающих и приемных радиотрактов для ММО различных конфигураций.

Трактов	Антенн	ПZF операций, ед.	Максимальное время на обработку, с		
			Qualcomm Snapdragon 8xx	Эльбрус-16С	Эльбрус 8СВ
6	12	$2,12 \cdot 10^5$	$1,42 \cdot 10^{-6}$ с	$2,83 \cdot 10^{-7}$ с	$5,61 \cdot 10^{-7}$ с
4	8	$2,29 \cdot 10^4$	$1,53 \cdot 10^{-7}$ с	$3,05 \cdot 10^{-8}$ с	$6,06 \cdot 10^{-8}$ с

Для подсчета примерных временных интервалов, по истечению которых требуется переключать антенны оценим, в течение какого времени параметры канала остаются постоянными. Типовая частота для современных систем связи - 3 ГГц. Выполним оценку для случая перемещения пользовательского терминала в пространстве со скоростью 72 км/час или 20 м/с. Доплеровский сдвиг частоты определяется по формуле:

$$f_d = \frac{V}{\lambda} = \frac{V \cdot f}{c}, \quad (33)$$

где в числителе – скорость движения, а в знаменателе – длина волны, соответствующая частоте сигнала или, что одно и то же – отношение скорости света к несущей частоте.

Доплеровский сдвиг частоты равен 200 Гц, период колебания составляет 5 миллисекунд – это время, за которое существенно меняется состояние канала связи. Возьмем интервал в 100 раз меньше и примем за время, в течение которого параметры канала практически постоянны равным 0,05 миллисекунд. В течение этого интервала времени переключать антенны нет необходимости.

Из Табл. 4 очевидно, что быстродействия современных микропроцессоров будет достаточно для поиска новым квазиоптимальным алгоритмом ПZF (24) лучшей комбинации антенн в системе ММО, а также и для периодического переключения антенн. На Рис. 5 показана сумма действительных операций сложений и умножений при различном равном количестве приемных и передающих радиотрактов для ММО с 8 пассивными приемными и 8 передающими антеннами.

Из анализа вычислительной сложности алгоритмов можно сделать вывод о значительном преимуществе нового алгоритма неполного перебора ПZF (24) с новым критерием оптимальности MinTrVzf (12) над известными оптимальными алгоритмами полного перебора с критериями оптимальности Frob (3), MaxCapFull (4) для большинства комбинаций активных радиотрактов и пассивных антенн ММО.

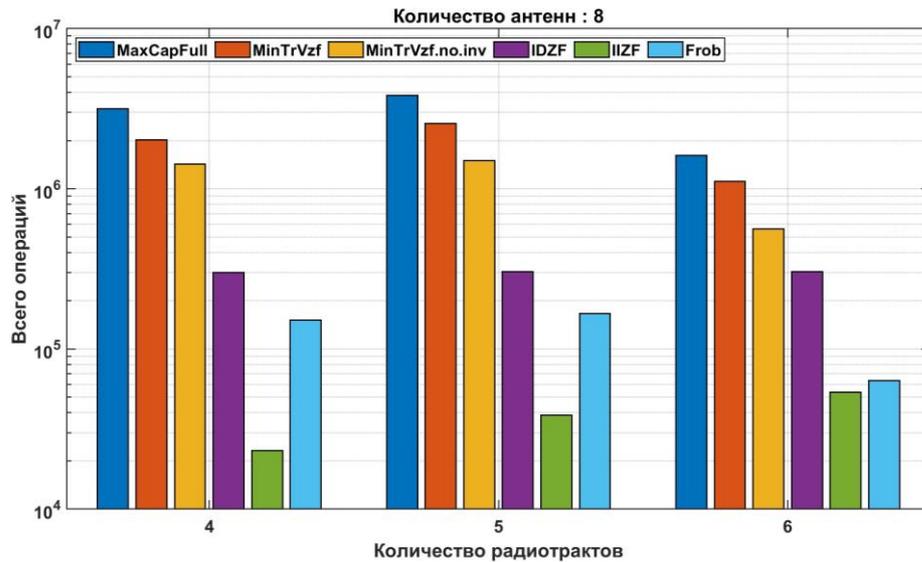


Рис. 5. Вычислительная сложность реализации известных и новых алгоритмов полного и неполного перебора для восьми пассивных приемных и передающих антенн.

Предлагаемый новый оптимальный алгоритм с новым критерием MinTrVzf (12) демонстрирует в 1,5 раза более низкую вычислительную сложность в сравнении с лучшим из известных оптимальных алгоритмов с критерием MaxCapFull (4).

Вычислительная сложность нового алгоритма неполного перебора IIZF (24) в сравнении с лучшим из известных оптимальных алгоритмов MaxCapFull (4) значительно, до двух – трех порядков, ниже для конфигураций ММО с количеством пассивных антенн 8, 10, 12. При этом, как это продемонстрировано в разделе 3 работы, эти алгоритмы обладают схожими характеристиками по помехоустойчивости.

Характеристики антенных переключателей есть в каталогах ведущих мировых производителей. Лучшее время переключения составляет 145 нс. В то же время, самая большая коммутируемая мощность 18 Вт. Максимальное число полюсов 5 (SP5T).

Для применения в активных системах связи ММО для получения максимальных преимуществ в энергетических характеристиках необходимо использовать переключатели с более лучшими параметрами внутренних потерь, величина которых, в идеале, не должна превышать 0,5 дБ. Из известных переключателей такие характеристики достижимы на частотах до 2 ГГц. На частоте в 3 ГГц неплохой считается величина внутренних потерь в 0,7-0,8 дБ, а на частоте в 6 ГГц – порядка 1 дБ.

К группе переключателей с низкими внутренними потерями в 2022 году от 0.35 дБ на 1000 МГц, от 0.5 дБ на 2000 МГц, от 0,75 дБ на 3000 МГц и порядка 1 дБ на 6000 МГц отнесены переключатели pSemi PE4239, PE42421, PE42430, PE42440, PE42441, PE4245, PE4250, PE4251, PE4256, PE4259, PE42641.

Учитывая изложенное выше, новый алгоритм неполного перебора с новым критерием оптимальности IIZF (24) возможно на практике реализовать в реальных системах связи ММО, что обосновано оценкой времени, затрачиваемого современным микропроцессором на его реализацию, а также подсчетом примерного времени, требуемого для переключения антенн.

Заключение

Основными результатами диссертационной работы являются:

1. Новый оптимальный алгоритм полного перебора с новым критерием оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции MinTrVzf (12) с наилучшими результатами в сравнении с лучшим из известных алгоритмов MaxCapFull (4) независимо от антенной конфигурации и значений BER . Выигрыш в помехоустойчивости системы при значении $BER = 10^{-3}$ составляет до 0,75 дБ в отсутствии пространственных корреляций замираний для конфигурации ММО 10x14. Характеристики помехоустойчивости при использовании нового критерия оптимальности MinTrVzf (12) улучшаются с ростом количества активных и пассивных антенн. Также растет выигрыш от использования критерия оптимальности MinTrVzf (12) в сравнении с использованием критерия MaxCapFull (4) с усилением корреляционных связей и при более низких значениях BER . Выигрыш в помехоустойчивости системы увеличивается до 1 дБ при более низких значениях $BER = 10^{-4}$. Алгоритм с MinTrVzf (12) демонстрирует при значении $BER = 10^{-3}$ выигрыш в 0,8 дБ в условиях наличия пространственных корреляций замираний для ММО низкой размерности 4x8 и при значениях корреляционных коэффициентов $\rho_r = -0,6$, $\rho_t = 0,6$.

2. Новый оптимальный алгоритм полного перебора с новым критерием оптимальности MinTrVzf (12) является в 1,5 раза менее сложным в реализации в сравнении с лучшим из известных оптимальных алгоритмов полного перебора с критерием оптимальности MaxCapFull (4).

3. Характеристики помехоустойчивости системы связи ММО с новым алгоритмом неполного перебора PZF (24) и новым критерием оптимальности (12) сопоставимы с характеристиками лучших оптимальных алгоритмов с критериями MinTrVzf (12) и MaxCapFull (4). Система с алгоритмом PZF (24) демонстрирует потери 0,2 – 0,5 дБ в сравнении с оптимальным алгоритмом с критерием MaxCapFull (4), при этом алгоритм PZF (24) обладает до двух – трех порядков более низкой вычислительной сложностью. Алгоритм неполного перебора PZF (24) с новым критерием оптимальности (12) можно реализовать в реальных системах связи ММО, что обосновано оценкой времени, затрачиваемого современным микропроцессором на его реализацию, а также подсчетом примерного времени, требуемого для переключения антенн, в том числе при использовании микропроцессоров отечественной архитектуры.

4. Используемые в системах ММО с автовыбором антенн антенные переключатели вносят дополнительные потери, при этом на частотах от 2 до 6 ГГц величина внутренних потерь антенных переключателей минимальна и составляет 0,5 – 1 дБ. Этот диапазон частот является основным для современных систем связи.

5. Вычисление нового критерия оптимальности MinTrVzf (12) также можно упростить, используя выражение (21).

Таким образом, цель диссертационного исследования достигнута, поставленные задачи решены.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

1. Крейнделин, В.Б. Алгоритмы переключения антенн в системах ММО / В.Б. Крейнделин, М.Л. Хазов. // Электросвязь. – 2017. – № 10. – С. 59-64.
2. Бакулин, М.Г. Критерии автовыбора антенн в системах ММО / М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, М.Л. Хазов // Электросвязь. – 2018. – № 10. – С. 78-81.
3. Крейнделин, В.Б. Исследование преимуществ автовыбора антенн в системах ММО в сравнении с базовой системой ММО без автовыбора антенн / В.Б. Крейнделин, М.Л. Хазов. // Цифровая обработка сигналов. – 2018. – №4. – С. 63-68.
4. Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Khazov M.L. (2023). New quasi-optimal algorithms of antenna selection with low complexity, 2023, T-Comm, vol.17, no.7, pp.47-56.

Публикации в сборниках трудов международных научно-технических конференций и форумов.

5. Крейнделин, В.Б. Преимущества и открытые вопросы при переключении антенн в многоантенных системах ММО / В.Б. Крейнделин, М.Л.Хазов. // Материалы международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2015» / М.: МИРЭА. – Часть 5. – 1-5 декабря 2015 г. – С. 236-238.
6. Крейнделин, В.Б. Проблемы применения технологии переключения антенн в многоантенных системах ММО / В.Б. Крейнделин, М.Л. Хазов. Материалы X международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» / МТУСИ. – 15-16 марта 2016 г. – С. 230.
7. Крейнделин, В.Б. Переключение антенн в системах ММО / В.Б. Крейнделин, М.Л. Хазов. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2017» / М.: МИРЭА. Часть 4. – 20–24 ноября 2017 г. – С. 1048-1051.
8. Хазов, М.Л. Сравнение систем ММО, с автовыбором антенн и без автовыбора антенн / М.Л.Хазов. Материалы XIII международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» / М.: МТУСИ. – 20-21 марта 2019 г.
9. Крейнделин, В.Б. Упрощение вычисления нового критерия автовыбора антенн в системах связи ММО / В.Б. Крейнделин, М.Л.Хазов. // Труды международной научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы 2021» / М.: МТУСИ. – 13-16 декабря 2021 г. – С. 280-293.
10. Крейнделин, В.Б. Упрощенные алгоритмы переключения антенн в системах связи ММО / В.Б. Крейнделин, М.Л.Хазов. // Труды международной научно-технической конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы 2022» / М.: МТУСИ. – 12-15 декабря 2022 г.