**Хазов Михаил Леонидович. Разработка и исследование алгоритмов переключения антенн в системах связи MIMO;[Место защиты: ОТКЗ ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики»], 2023**

**Ордена Трудового Красного Знамени**

**федеральное государственное бюджетное**

**образовательное учреждение высшего образования**

**«Московский технический университет связи и информатики»**

**На правах рукописи**

**Хазов Михаил Леонидович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ**

**АЛГОРИТМОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ АНТЕНН**

**В СИСТЕМАХ СВЯЗИ MIMO**

**Специальность 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**Диссертация на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Научный руководитель доктор технических наук, профессор Крейнделин В.Б.**

**Москва, 2023**

**Оглавление**

**ВВЕДЕНИЕ 4**

**1. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ MIMO ИЗВЕСТНЫХ АЛГОРИТМОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ АНТЕНН С ИЗВЕСТНЫМИ КРИТЕРИЯМИ ОПТИМАЛЬНОСТИ 16**

**1.1. Модель системы MIMO без переключения (автовыбора) антенн 16**

**1.2. Модель системы MIMO с переключением антенн 20**

**1.3. Алгоритмы переключения антенн с полным и неполным перебором 27**

**1.4. Анализ известных алгоритмов переключения антенн, использующих**

**известные критерии оптимальности 33**

**1.5. Вычислительная сложность алгоритмов переключения антенн 35**

**1.6. Выводы к разделу 1 41**

**2. НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ОТ**

**ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АЛГОРИТМЕ ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА. 43**

**2.1. Предлагаемый новый критерий оптимальности для автовыбора антенн**

**43**

**2.2. Анализ предлагаемого критерия оптимальности в условиях отсутствия**

**пространственной корреляции замираний 47**

**2.3. Вычислительная сложность для алгоритма полного перебора с новым**

**критерием оптимальности 51**

**2.4. Упрощение вычисления следа корреляционной матрицы ошибок**

**оценивания 53**

**2.5. Вычислительная сложность для алгоритма полного перебора с новым**

**упрощенным критерием оптимальности 57**

**2.6. Анализ предлагаемого критерия оптимальности с упрощенным**

**вычислением следа корреляционной матрицы ошибок оценивания в условиях отсутствия пространственной корреляции замираний 61**

**2.7. Выводы к разделу 2 64**

**3. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ НОВЫХ АЛГОРИТМОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ**

**АНТЕНН В СИСТЕМАХ СВЯЗИ MIMO НА ОСНОВЕ НОВОГО КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ 65**

**3.1. Новый упрощенный алгоритм переключения антенн № 1 65**

**3.2. Новый упрощенный алгоритм переключения антенн № 2 68**

**3.3. Анализ характеристик известных и предлагаемых алгоритмов в**

**условиях отсутствия пространственной корреляции замираний 69**

**3.4. Анализ характеристик предлагаемых алгоритмов в условиях наличия**

**пространственной корреляции замираний 77**

**3.5. Вычислительная сложность для алгоритма неполного перебора с**

**новым критерием оптимальности 89**

**3.6. Выводы к разделу 3 93**

**4. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ**

**ПРЕДЛОЖЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ АНТЕНН 95**

**4.1. Оценка вычислительной сложности при использовании различных критериев переключения антенн в условиях полного и неполного перебора 95**

**4.2. Оценка энергетических потерь в антенных переключателях 104**

**4.3. Выводы к разделу 4 108**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ 109**

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 111**

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 113**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1 124**

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

Заключение

Основными результатами диссертационной работы являются:

* Новый оптимальный алгоритм полного перебора с новым критерием оптимальности в виде минимума следа корреляционной матрицы ошибок демодуляции MinTrVzf (43) с наилучшими результатами в сравнении с лучшим из известных алгоритмов MaxCapFull (12) 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 MIMO 10x14. Характеристики помехоустойчивости при использовании нового критерия оптимальности MinTrVzf (43) улучшаются с ростом количества активных и пассивных антенн. Также растет выигрыш от использования критерия оптимальности MinTrVzf (43) в сравнении с использованием критерия MaxCapFull (12) 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 MinTrVzf (43) демонстрирует при значении *BER =* 10-3 выигрыш в 0,8 дБ в условиях наличия пространственных корреляций замираний для MIMO низкой размерности **4x8** и при значениях корреляционных коэффициентов *p =* -0,6, *pt=* 0,6 (66).
* Новый оптимальный алгоритм полного перебора с новым критерием оптимальности MinTrVzf (43) является в 1,5 раза менее сложным в реализации в сравнении с лучшим из известных оптимальных алгоритмов полного перебора с критерием оптимальности MaxCapFull (12).
* Характеристики помехоустойчивости системы связи MIMO с новым алгоритмом неполного перебора IIZF (59) и новым критерием оптимальности (40) сопоставимы с характеристиками лучших оптимальных алгоритмов с критериями MinTrVzf (43) и MaxCapFull (12). Система с алгоритмом IIZF (59) демонстрирует потери 0,2 - 0,5 дБ в сравнении с оптимальным алгоритмом с критерием

MaxCapFull (12), при этом алгоритм IIZF (59) обладает до двух - трех порядков более низкой вычислительной сложностью. Алгоритм неполного перебора IIZF (59) с новым критерием оптимальности (40) можно реализовать в реальных системах связи MIMO, 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.

* Используемые в системах MIMO 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.
* Вычисление нового критерия оптимальности MinTrVzf (43) также можно упростить, используя выражение (54) [(Рис. 11)](#bookmark86).

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