Пешков, Илья Владимирович. Адаптивные алгоритмы пространственной обработки сигналов, эффективные при случайных дестабилизирующих воздействиях : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.03 / Пешков Илья Владимирович; [Место защиты: Воронеж. гос. ун-т].- Воронеж, 2012.- 182 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-1/1005

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Воронежский государственный университет»

На правах рукописи

Пешков Илья Владимирович

Адаптивные алгоритмы пространственной обработки сигналов, эффективные

при случайных дестабилизирующих воздействиях

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

профессор,

Заслуженный деятель науки РФ Нечаев Юрий Борисович

Воронеж-2012

Содержание

Введение . 6

Глава 1. Технология адаптивного формирования диаграммы направленности в системах беспроводной связи 17

1.1. Передача информации в современных системах радиосвязи 17

1.1.1. Развитие систем сотовой связи 17

1.1.2. Антенны в беспроводных системах связи 20

1.1.3. Антенные решетки с электрическим движением луча 24

1.1.3.1. Аналоговое диаграммообразование 25

1.1.3.2. Фазированная антенная решетка 27

1.1.3.3. Цифровое формирование диаграммы направленности 28

1.1.4. Необходимость применения адаптивных антенных решеток 29

1.2. Адаптивные алгоритмы диаграммообразования, применяемые в

идеальных условиях работы 33

1.2.1. Базовые предположения 34

1.2.2. Алгоритмы, использующие пространственные характеристики 35

1.2.2.1. Метод MUSIC 37

1.2.2.2. Метод проецирования сигнального подпространства 37

1.2.2.3. Метод проецирования шумового подпространства 37

1.2.2.4. Метод Кейпона 38

1.2.2.5. Классический формирователь ДН 38

1.2.2.6. Управляющий нулями формирователь ДН 38

1.2.2.7. Формирователь ДН, максимизирующий ОСШ 39

1.2.2.8. Формирователь ДН, максимизирующий ОСПШ 40

1.2.2.9. Диаграммообразование с критерием минимума дисперсии 40

1.2.2.10. Алгоритм SMI 41

1.2.3. Алгоритмы, использующие временной опорный сигнал 41

1.2.3.1. Алгоритм наименьшей среднеквадратичной ошибки 42

1.2.3.2. Итерационный алгоритм наименьшей среднеквадратической

ошибки 43

з

1.2.3.3. Рекурсивный метод наименьших квадратов 44

1.2.3.4. Алгоритм афинных проекций ...44

1.2.3.5. Алгоритм квази-Ньютона 45

1.3. Снижение эффективности диаграммообразования ААР 46

1.3.1. Взаимное влияние антенных элементов 46

1.3.2. Влияние погрешностей каналов ААР предварительной обработки

сигналов 50

1.3.2.1. Неидентичности аналоговых приемных трактов 50

1.3.2.2. Фазовый шум 51

1.3.2.3. Разбалансировка преобразования в синфазный и квадратурный

каналы ...52

1.3.2.4. Квантование 52

1.3.3. Внешние условия, снижающие эффективность работы ААР 53

1.3.3.1. Недостаточное количество отсчетов и подмешивание полезного

сигнала в обучающую последовательность 53

1.3.3.2. Нестационарность среды 54

1.3.3.3. Замирания сигналов 55

1.4. Выводы к главе 56

Глава 2. Калибрование амплитудно-фазового рассогласования аналоговых каналов ААР 57

2.1. Автокалибровочные алгоритмы определения координат ИРИ 59

2.1.1. Метод Фридландер-Вайса 59

2.1.2. Метод Ванга-Кедзоу 60

2.1.3 Метод Эстели-Свиндлехарста-Оттерсона 62

2.1.4. Оценка эффективности автокалибровочных алгоритмов при

наличии амплитудно-фазовых ошибок в каналах ААР 62

2.2. Описание разработанного алгоритма 68

2.2.1. Статистическая оценка эффективности предложенного

автокалибровочного алгоритма 73

2.3. Исследование способности алгоритмов автоматического калибрования

обнаруживать ошибки в каналах ААР 81

2.4. Выводы к главе 86

Глава 3. Конструирование ААР 89

3.1. Имитационное моделирование и исследование дестабилизирующих

воздействий на аналоговые каналы ААР 89

3.1.1. Конструирование аналоговой части ААР 89

3.1.2. Исследование основных характеристик модуля первичной

обработки сигнала ААР 104

3.1.3. Оценка влияния параметров модуля первичной обработки на работу

ААР 108

3.2. Реализация цифровой части ААР 112

3.3. Автоматическое калибрование имитационной модели ААР 117

3.4. Экспериментальный образец ААР 121

3.4.1. Программный пакет «Autocalibration Adaptant vl.O» 125

3.5. Выводы к главе 127

Глава 4. Повышение эффективности ААР в нестационарных условиях 129

4.1. Алгоритмы определения углов прихода радиосигналов в условиях

многолучевого распространения 129

4.1.1. СКО пеленга кольцевой АР в условиях многолучевого

распространения 131

4.1.2. СКО пеленга линейной АР в условиях многолучевого

распространения 134

4.2. Снижение уровня боковых лепестков ДН 136

4.3. Алгоритмы формирования диаграммы направленности линейной АР с

расширенными нулями 139

4.3.1. Алгоритм формирования ДН Мэйлу-Затмана 139

4.3.2. Алгоритм формирования ДН Тафернера 141

4.3.3. Алгоритм формирования ДН Гершмана 142

4.3.3. Алгоритм формирования ДН Риба 144

4.4. Исследование алгоритмов диаграммообразования с расширенными

нулями линейной АР 147

4.5. Диаграммообразование кольцевой АР, эффективное в нестационарных

условиях 151

4.5.1. Гауссовское распределение 151

4.5.2. Равномерное распределение 152

4.5.3. Исследование предложенного алгоритма расширения нулей

диаграммы направленности 154

4.6. Выводы к главе 159

Заключение 161

Список использованной литературы 165

Заключение

Актуальным на сегодняшний день является вопрос улучшения качества современных беспроводных коммуникационных систем, к которым предъявляются жесткие требования по увеличению информационной емкости каналов связи, помехозащищенности и т.п. Для выполнения данных требований необходимо с минимальными искажениями принимать полезный сигнал и максимально эффективно бороться с активными помехами в радиоканале.

Анализ, проведенный в первой главе, показал, что применение алгоритмов пространственной фильтрации ААР в современных системах беспроводной связи является эффективным, поскольку по сравнению с другими антенными системами данный тип антенн обладают рядом уникальных возможностей, главной из которых является формирование ДН, которая позволяет максимально подавить шум и помехи при минимальных искажениях полезного сигнала. Достигается это суммированием сигналов с элементов решетки с такими амплитудами и фазами, которые обеспечивают формирование провалов диаграммы направленности решетки в направлениях помех, с главным лепестком, установленным на полезный сигнал.

В настоящее время создан ряд алгоритмов, которые теоретически достаточно хорошо справляются с основными задачами пространственной обработки сигналов в ААР. Однако на практике на эффективность их работы достаточно серьезное влияние оказывают несколько негативных факторов: амплитудно-фазовые флуктуации аналоговых каналов, многолучевое распространение, недостаточное количество выборок, подвижность источников помех и др., что выражается в снижении ОСПШ системы в целом. В связи с этим, актуальным является вопрос снижения негативного воздействия вышеописанных факторов на алгоритмы диаграммообразования, поэтому диссертационная работа посвящена исследованию вопросов пространственной обработки, эффективной в условиях со случайными дестабилизирующими воздействиями.

В качестве основных методов решения поставленных задач в диссертации были приняты аналитические методы как дающие точный и поддающийся прямой проверке результат в виде математических зависимостей, а также численное и имитационное моделирование и анализ результатов работы существующих и разработанных алгоритмов пространственной обработки сигналов в составе макета ААР.

В результате проведенных исследований был получен ряд научных результатов:

* Автокалибровочные методы с условно-постоянной моделью ошибок в каналах ААР в целом позволяют снижать среднеквадратическое отклонение определения координат ИРИ, повысить выходное отношение мощности полезного сигнала к мощности помех и шума, а также определять амплитудные и фазовые ошибки. Однако ни один из них не является идеальным для применения в составе ААР, т.к. метод Фридландер-Вайса практически не изменяет СКО пеленгов и ОСПШ в присутствии амплитудных ошибок и зависит от значений угловых координат, определяемых на первом шаге итерации; метод Ванга-Кедзоу при низких и средних значениях ОСИ! значительно увеличивает СКО пеленгов и, как следствие, снижает ОСПШ; метод Эстели-Свиндлехарста-Оттерсона имеет самые большие СКО пеленгов во всем рассмотренном шумовом диапазоне.
* Новый алгоритм автоматического калибрования является малочувствительным к ОСШ и устойчивым к ошибкам в каналах ААР, позволяя получить снижения СКО пеленгов для двух сигналов практически до нулевого значения, повысить ОСПШ в каналах ААР до значений 46.85, 26.8 и 16.79 дБ для ОСШ 40, 20 и 10 дБ соответственно, а также оценивать амплитудные и фазовые ошибки рассогласования аналоговых каналов с точностью, превосходящей другие алгоритмы в 2-3 раза.
* Разработана имитационная модель ААР на основе современной элементной базы электронных компонентов, учитывающая характеристики и параметры, заложенные производителями. Исследования показали, что незначительные отклонения номиналов элементов всего на 1.7% приводят к значительному ухудшению рабочих характеристик ААР - снижению отношения сигнал/помеха более чем на 60 дБ.
* Использование алгоритмов автоматического калибрования в составе разработанной имитационной модели ААР показало, что они могут быть использованы для снижения влияния помех сигналов на полезный сигнал. Наилучшие результаты в этом продемонстрировал предложенный алгоритм автоматического устранения амплитудно-фазового рассогласования ААР.
* Получены результаты практической реализации алгоритмов автоматического калибрования Фридландер-Вайса, Ванга-Кедзоу и предложенного в экспериментальном образце ААР, заключающиеся в получении пеленгационных характеристик, более пригодных для установления угловых координат ИРИ и формирования ДН.
* Реализованные алгоритмы Фридландер-Вайса, Ванга-Кедзоу и предложенный в составе программного пакета «Autocalibration Adaptant vl.O» позволяют проводить калибрование АР в присутствии амплитудных и фазовых ошибок в каналах без использования дополнительных знаний и устройств. Данный программный пакет использует простой формат файлов для проведения вышеобозначенной операции, настройки линейной и кольцевой антенных решеток, благодаря чему он может быть использован к востребованным на практике типам АР.
* Анализ показал, что среди алгоритмов диаграммообразования с расширенными нулями для линейных АР алгоритм Тафернера оказался самым устойчивым к подвижным помехам и среде с многолучевым распространением, повысив ОСПШ до значений 28.6 и 15.24 дБ соответственно для ОСШ 30 дБ и смещению помехи на 8° и разбросе рассеивателей на 25° относительно других алгоритмов подобного типа.

Среди особенностей алгоритмов формирования диаграмм направленности с широкими нулями можно выделить снижение глубины нулей ДН, а также недостаточную способность подавлять некоррелированный шум.

Предложенный алгоритм формирования ДН с расширенными нулями для кольцевой АР показал увеличение ОСПШ в сравнении с традиционными алгоритмами формирования ДН в среде с многолучевым распространением радиосигналов (на 11 дБ для ОСШ 30 дБ) и с подвижной помехой (на 12 дБ для ОСШ 30 дБ). Кроме того, алгоритм, основанный на равномерном случайном распределении источников сигнала в пространстве, дал большее увеличение ОСПШ по сравнению с подходом, предполагающим гауссовское распределение