

005016887

На правах рукописи

Пешков Илья Владимирович

Адаптивные алгоритмы пространственной обработки сигналов, эффективные
при случайных дестабилизирующих воздействиях

Специальность 01.04.03 – Радиоп физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

10 МАЙ 2012

Воронеж – 2012

Работа выполнена в Воронежском государственном университете

Научный руководитель: Нечаев Юрий Борисович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Парфенов Владимир Иванович
доктор физико-математических наук, профессор
Воронежский государственный университет,
профессор

Ярыгин Анатолий Петрович
доктор технических наук, профессор
Воронежское высшее военное авиационное
инженерное училище,
главный научный сотрудник

Ведущая организация: Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань

Защита состоится 31 мая 2012 года в 15²⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.038.10 при Воронежском государственном университете по адресу: 394693, Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета.

Автореферат разослан «25» апреля 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Маршаков Владимир Кириллович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время проблемы повышения емкости и пропускной способности беспроводных информационных систем в условиях ограниченного диапазона частот и сложной помеховой обстановки приводят к сложно решаемым задачам. Снижение уровней активных помех, которые создают абоненты, работающие на одной несущей частоте, позволит повысить значение отношения мощности полезного сигнала к сумме мощностей помех и шума (ОСПШ) и, как следствие, положительно скажется на увеличении емкости и пропускной способности. Одним из самых эффективных способов повышения помехозащищенности беспроводных систем является использование пространственной обработки сигналов адаптивными антенными решетками (ААР). Значительный вклад в развитие теории пространственной фильтрации внесли ученые: О.Г. Вендик, А.Б. Гершман, Д.И. Воскресенский и другие. Среди зарубежных авторов: P. Stoica, B. Ottersten, L. Swindlehurst, M. Viberg, B. Friedlander, A. Weiss, C. A. Balanis, H. Van Trees, L. Godara, B. Widrow, J. Litva, S. Haykin, S.D. Stearns и другие.

Для пространственной фильтрации сигналов необходима информация о местоположении источников радиоизлучения (ИРИ), которая обуславливает корректность установки нулей и максимумов диаграммы направленности (ДН), а, следовательно, ОСПШ и помехозащищенность системы. Однако переотражения сигналов, вызванные рассеивателями радиоволн, отказ работы отдельных элементов, а также изменения температуры приводят к отклонению распределения поля в раскрыве антенной решетки (АР) от номинального и, как следствие, снижению точности оценок угловых координат ИРИ. Кроме того, снижение ОСПШ может быть вызвано подвижностью интерферирующих источников радиоизлучения или колебанием мачты с антенной решеткой. В таких случаях быстрая подстройка весовых коэффициентов не реализуется, вследствие чего отмечается недостаточное пространственное подавление помехи в связи с расхождением направлений прихода сигнала и нуля ДН.

В связи с этим при практической реализации методов пространственной фильтрации в реальных системах решается ряд задач, связанных с коррекцией амплитудно-фазового рассогласования, уменьшением влияния многолучевого распространения, конечного числа выборок, подавлением полезного сигнала, нестационарностью среды. Поэтому представляется актуальным исследование алгоритмов пространственной обработки сигналов в условиях негативных факторов в части формирования ДН.

Целью работы является исследование влияния сложной помеховой обстановки на качество пространственной фильтрации сигналов и разработка алгоритмов пространственной обработки сигналов, предназначенных для повышения ОСПШ адаптивных антенных решеток.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

1. Численная оценка и сравнительный анализ эффективности работы алгоритмов калибрования на основе математической модели ААР. Выработка рекомендаций по применению изученных методов с указанием особенностей и ограничений практической реализации.

2. Разработка нового алгоритма устранения амплитудно-фазового рассогласования ААР, имеющего более высокую точность оценок ошибок каналов на фоне шума.

3. Построение имитационной модели адаптивной антенной решетки, пригодной для анализа характеристик многоантенных систем связи при наличии амплитудно-фазовых ошибок каналов приема.

4. Анализ работы алгоритмов пространственной обработки сигналов в условиях действия негативных факторов, снижающих качество пространственной фильтрации.

5. Разработка нового алгоритма формирования диаграммы направленности с улучшенными характеристиками пространственной фильтрации в нестационарной среде распространения радиосигналов.

Методы исследования.

При решении задач, поставленных в диссертационной работе, используются аналитические и вычислительные методы современного математического аппарата статистической радиофизики: аппарат теории вероятностей и математической статистики, методы математического анализа, математический аппарат теории матриц, методы теории случайных процессов, методы моделирования на ЭВМ.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Результаты статистического анализа итерационных автокалибровочных алгоритмов определения угловых координат сигналов, предполагающих условно-постоянную модель ошибок.

2. Алгоритм пространственной обработки сигналов в условиях амплитудно-фазового рассогласования аналоговых каналов ААР, основанный на определении фаз во всех каналах адаптивной антенной решетки с использованием численного дифференцирования целевой функции, слабо зависящей от некоррелированного шума.

3. Имитационная модель ААР, позволяющая определить характеристики пространственной фильтрации с учетом флуктуаций условий наблюдения.

4. Результаты моделирования и статистического анализа робастных алгоритмов пространственной обработки сигналов с использованием диагональной регуляризации пространственной корреляционной матрицы в условиях подвижного источника помехи, многолучевого распространения радиосигналов и ограниченного количества отсчетов.

5. Алгоритм формирования диаграммы направленности кольцевых антенных решеток с расширенными провалами, предполагающий равномерное или гауссовское пространственное распределение источников помеховых сигналов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Впервые выполнено исследование итерационных автокалибровочных алгоритмов определения угловых координат ИРИ на основе условно-постоянной модели ошибок с выявлением преимуществ и недостатков каждого из них.

2. Синтезирован автокалибровочный алгоритм определения угловых координат ИРИ, позволяющий повысить точность их оценок при наличии амплитудных и фазовых ошибок в трактах ААР за счет использования метода наискорейшего спуска для решения задачи оптимизации целевой функции.

3. Установлена критичность истинных параметров конструктивных элементов ААР. Отклонения номиналов элементов на 1.7% приводят к снижению отношения сигнал/помеха более, чем на 60 дБ.

4. Впервые проведен сравнительный анализ робастных алгоритмов диаграммообразования, эффективно подавляющих подвижную помеху и компенсирующие колебания АР при малом количестве выборок, в которых присутствуют компоненты полезного сигнала.

5. Впервые разработан алгоритм формирования диаграммы направленности с расширенными нулями для кольцевых антенных решеток. В сравнении с традиционными новый алгоритм отличается достаточно высоким ОСПШ в условиях многолучевого распространения радиоволн и быстро меняющейся помеховой обстановки благодаря введению условия о непрерывном пространственном распределении источников помех.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается корректностью использования математического аппарата, совпадением новых результатов с известными в частных случаях, результатами статистического моделирования.

Практическая значимость работы заключается в повышении точности оценок угловых координат и величины сигнал/(помеха+шум) в условиях действия шума и рассогласования аналоговых трактов за счет использования нового алгоритма автоматического калибрования, что способствует созданию систем связи с улучшенными характеристиками по сравнению с существующими. Программная реализация алгоритмов автоматического калибрования может быть использована при исследованиях и эксплуатации многоканальных антенных систем. Алгоритм формирования диаграммы направленности кольцевой АР применим для адаптивного подавления помех при быстрой смене положений их источников между периодами адаптации, при колебаниях конструкции самой антенны, а также в условиях многолучевого распространения радиоволн.

Реализация результатов исследования. Полученные в диссертации результаты использованы при постановке и выполнении НИР «Разработка и применение новых методов обработки, передачи и защиты информации в информационно-коммуникационных системах» (гос. регистрац. № 012202.04120808) в Воронежском государственном университете, грантов РФФИ (проекты 08-02-13555-офи_ц, 09-07-97522-р-центр_а, 11-07-00600-а). Отдельные результаты внедрены при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ОАО «Концерн «Созвездие», ОАО «НИИ «Вега», проводимых по заказам МО РФ и гражданских ведомств, а также в учебном процессе в Воронежском государственном университете, что подтверждается актами о внедрении. В настоящее время полученные результаты используются при создании комплексов связи с характеристиками

помехоустойчивости и пропускной способности, превышающими аналогичные показатели аппаратуры связи предыдущего поколения.

Личный вклад автора. Основные результаты работы получены лично автором и опубликованы в соавторстве с научным руководителем Ю.Б. Нечаевым. В совместных работах научному руководителю принадлежат постановки задач, определение направлений исследований и анализ полученных результатов. Подробное проведение рассуждений, расчетов, анализ и интерпретация полученных результатов выполнены лично автором.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научных конференциях в гг. Москва [13], Воронеж [8,9,11,12,17], Челябинск [10], Самара [14], Белгород [15], Казань [16].

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 18 работах, в том числе [1-7] из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 196 наименований. Объем диссертации составляет 182 страницы, в ней содержится 55 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, рассмотрено современное состояние вопроса, сформулированы цель работы и решаемые задачи, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе данных из научных источников приведен анализ основных принципов и методов пространственной обработки сигналов, для каждого из которых сформулированы преимущества и недостатки. Обоснована необходимость решения задач в условиях, представляющих значительный интерес: присутствие амплитудно-фазовых ошибок в каналах ААР, многолучевое распространение радиоволн, механические колебания антенной решетки, высокая скорость передвижения источников помех и недостаточное количество отсчетов для формирования требуемой ДН.

Введены аналитические модели сигналов на выходе АР произвольной конфигурации в условиях амплитудно-фазового рассогласования (1), а также многолучевого распространения радиоволн (2):

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{GA}(\theta) \cdot \bar{\mathbf{s}}(k) + \bar{\mathbf{n}}(k), \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{x}}(k) = \sum_{m=1}^M \left(\sum_{l=1}^{N_s} \alpha_{ml}(k) \exp(j\varphi_{ml}(k)) \bar{\mathbf{a}}(\theta_m + \tilde{\theta}_{ml}) \right) \cdot \mathbf{s}_m(k) + \bar{\mathbf{n}}(k), \quad (2)$$

где N – число антенных элементов (АЭ), M – число сигналов, $\bar{\mathbf{s}}(k) = [s_1(k), \dots, s_M(k)]^T$ – вектор сигналов, $s_m(k)$ – сигнал m -го источника, $\bar{\mathbf{n}}(k) = [n_1(k), \dots, n_N(k)]^T$ – вектор шума, $\mathbf{A}(\theta)$ – матрица N -мерных направляющих векторов $[\bar{\mathbf{a}}(\theta_1), \dots, \bar{\mathbf{a}}(\theta_M)]$, \mathbf{G} – диагональная матрица амплитудно-фазового рассогласования, $\alpha_{mk}(k)$, $\varphi_{mk}(k)$ и $\theta_m + \tilde{\theta}_{mk}$ – амплитуда, фазовая задержка и угол прихода l -го луча m -го источника соответственно, N_s – число рассеивателей, k – момент времени, j – мнимая единица.

Вторая глава посвящена исследованию и разработке автокалибровочных

алгоритмов, предполагающих постоянство ошибок в аналоговых каналах за время обработки. В процессе обработки значения координат ИРИ и ошибок определяются оптимизацией различных целевых функций, реализованных в алгоритмах Фридландер-Вайса [Friedlander B., Weiss A.J.], Ванга-Кедзоу [Wang C., Cadzow J.A.], Эстели-Свиндлхарста-Оттерсона [Asztely D., Swindlehurst A.L., Ottersten B.]. Данный тип алгоритмов позволяет без привлечения дополнительных устройств и измерений в реальном масштабе времени выполнять поиск ошибок аналоговых трактов ААР и определять угловые координаты источников радиоизлучения.

Для сравнительной оценки автокалибровочных алгоритмов предполагалось, что источники сигналов имеют координаты с азимутами 25° и 85° (помеха) относительно первого АЭ кольцевой АР, состоящей из пяти элементов, расстояние между которыми составляет 0.5λ . При этом взаимное влияние не учитывалось. В каналах присутствовали некоррелированный шум с отношением сигнал/шум (ОСШ), равным 40 дБ, 20 дБ и 10 дБ, а также амплитудные (g_n) и фазовые (ϕ_n) ошибки

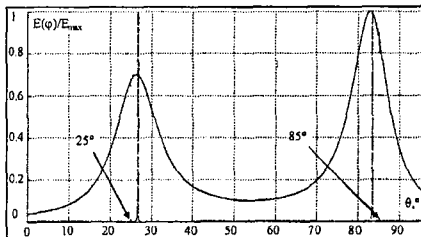
$$g_n = 1 + \rho \text{СКО}_g, \quad \phi_n = \rho \text{СКО}_\phi,$$

где ρ – нормально распределенная случайная величина, СКО_g и СКО_ϕ – соответственно среднеквадратические отклонения (СКО) амплитудной и фазовой ошибок. Для каждого алгоритма матрица Γ задавалась единичной на первом шаге оптимизации. Точность рассматриваемых алгоритмов в определении ошибок в каналах оценивалась путем усреднения СКО установленных фазовых (СКО_ϕ) и амплитудных (СКО_g) ошибок от истинных значений соответствующих сдвигов в каналах ААР

$$\text{СКО}_\phi = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left(\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\phi_{in} - \hat{\phi}_{in})^2 \right)^{0.5}, \quad \text{СКО}_g = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left(\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (g_{in} - \hat{g}_{in})^2 \right)^{0.5},$$

где ϕ_{in} и $\hat{\phi}_{in}$ – соответственно истинное и вычисленное значение фазовой ошибки n -го канала в i -испытании, g_{in} и \hat{g}_{in} – соответственно истинное и вычисленное значение амплитудной ошибки n -го канала в i -испытании, L – количество испытаний.

Установлено, что алгоритм Фридландер-Вайса, заключающийся в итерационных повторениях двух последовательных этапов, зависим от оценок пеленгов ИРИ, получаемых на первом этапе первой итерации с использованием метода MUSIC, в предположении, что ошибки каналов известны. Значениям этих пеленгов ставятся в соответствие определяемые на втором этапе амплитудные и фазовые ошибки, что в целом минимизирует целевую функцию. Как показано на рис. 1, выходная функция $E(\varphi)$ алгоритма Фридландер-Вайса имеет более четкие

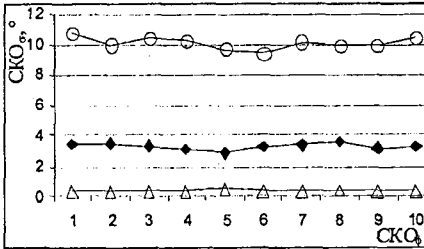


--- Фридландер-Вайса — MUSIC
Рис. 1. Угловой спектр для ОСШ 20 дБ,
 $\text{СКО}_g=0.1$ и $\text{СКО}_\phi=6^\circ$

результаты. Значениям этих пеленгов ставятся в соответствие определяемые на втором этапе амплитудные и фазовые ошибки, что в целом минимизирует целевую функцию. Как показано на рис. 1, выходная функция $E(\varphi)$ алгоритма Фридландер-Вайса имеет более четкие

пики, чем метода MUSIC, из которых однако определяются одни угловые координаты. Поэтому близости среднеквадратического отклонения пеленгов ($СКО_\sigma$) алгоритма Фридландер-Вайса и метода MUSIC и, как следствие, ОСПШ (табл. 1), обусловлены высокими $СКО_\phi$ и $СКО_\theta$.

Рассмотрено влияние шума в каналах ААР на работу автокалибровочных алгоритмов. Такое влияние очевидно для алгоритма Ванга-Кедзоу, который основан на оптимизации Ньютона-Гаусса с применением ортогонализации Грамма-Шмидта, и позволяет определить направления прихода ИРИ, амплитудно-фазовые ошибки одновременно на каждом шаге итерации. Так, при



—△—△— ОСПШ 40дБ ◆◆◆◆ ОСПШ 20дБ
 ○○○○ ОСПШ 10дБ

Рис. 2. Зависимость $СКО_\sigma$ от $СКО_\phi$ алгоритма Ванга-Кедзоу

снижении ОСПШ от 40 до 10 дБ $СКО_\sigma$, $СКО_\phi$ и $СКО_\theta$ увеличиваются более, чем в 20 раз (табл. 2). Наряду с этим, при высоких ОСПШ точности пеленгования и оценки ошибок довольно высоки ($СКО_\sigma \approx 0.3^\circ$, $СКО_\phi \approx 0.2^\circ$ при ОСПШ=40дБ) во всем диапазоне моделированных ошибок (рис. 2). Такое поведение вызвано независимым дифференцированием зашумленной целевой функции по углам прихода и ошибкам.

Алгоритм Эстели-Свиндлхарста-Оттерсона подобен алгоритму Фридландер-Вайса в том, что на каждом шаге итераций ошибки каналов и координаты ИРИ определяются раздельно друг от друга. Его сходимость составляет 33-53% от всего количества испытаний в составе кольцевой АР. Поэтому $СКО_\sigma$ этого алгоритма сложно назвать объективным, так как значение пеленга не учитывалось, если отклонение от истинного угла ИРИ снижалось на 15° и более в сравнении с методом MUSIC.

Исходя из вышесказанного, для предложенного алгоритма используется целевая функция алгоритма Фридландер-Вайса, наименее чувствительная к некоррелированному шуму

$$f_{our} = \sum_{m=1}^M \left\| \hat{\mathbf{E}}_N^H \Gamma \hat{\mathbf{a}}(\theta_m) \right\|^2,$$

где $\hat{\mathbf{E}}_N^H$ — матрица шумового подпространства, состоящая из собственных векторов, соответствующих $(N-M)$ самым малым собственным значениям пространственной корреляционной матрицы, полученной из K отсчетов

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{\mathbf{x}}(k) \bar{\mathbf{x}}(k)^H.$$

Для минимизации f_{our} проводится независимое численное дифференцирование по углам прихода радиосигналов и ошибкам в каналах в соответствии с методом наискорейшего спуска, подобно алгоритму Ванга-Кедзоу, $СКО_\sigma$ которого достаточно низкое в слабой шумовой обстановке. Из

данных, приведенных в табл. 1 и 2 (верхняя ячейка – приведены данные, когда внесена только амплитудная ошибка с $СКО_g=0,3$, нижняя ячейка – приведены данные, когда внесена только фазовая ошибка с $СКО_φ=10^0$), видно, что разработанный алгоритм показывает более высокие точности определения угловых координат ИРИ и ошибок в каналах (в 5-6 раз для алгоритма Фридландер-Вайса и в 10 раз для алгоритма Ванга-Кедзоу), что обуславливает высокие значения ОСПШ в сравнении с другими алгоритмами (разница составляет 3-11 дБ; для метода MUSIC – свыше 25 дБ).

Таблица 1.

ОСШ, дБ	MUSIC		Алгоритм Фридландер-Вайса				Алгоритм Эстели-Свиндлехарста-Оттерсона	
	$СКО_{\sigma}, ^\circ$	ОСПШ, дБ	$СКО_{\sigma}, ^\circ$	ОСПШ, дБ	$СКО_{\dot{\sigma}},$ отн.ед.	$СКО_{\dot{\phi}}, ^\circ$	$СКО_{\sigma}, ^\circ$	Отказы
40	7,1347	18,2963	7,0959	24,1554	0.1232	3.3734	4,7747	117
	6,4605	24,0566	5,3245	30,4521	0.0958	2.8691	4,5835	143
20	7,1401	17,1459	7,108	20,8470	0.1235	3.4174	4,9698	120
	6,4752	21,503	5,345	24,359	0.0957	2.9028	4,3454	143
10	7,1678	13,7065	7,1464	15,2698	0.1251	3.6955	4,5882	145
	6,5159	15,6733	5,4097	16,494	0.0962	3.1793	4,5891	133

Таблица 2.

ОСШ, дБ	Предложенный алгоритм				Алгоритм Ванга-Кедзоу			
	$СКО_{\sigma}, ^\circ$	ОСПШ, дБ	$СКО_{\dot{\sigma}},$ отн.ед.	$СКО_{\dot{\phi}},$ °	$СКО_{\sigma}, ^\circ$	ОСПШ, дБ	$СКО_{\dot{\sigma}},$ отн.ед.	$СКО_{\dot{\phi}},$ °
40	0	46,8546	0.0003	0.0221	0,3612	35,9086	0.0077	0.1913
	0,0231	46,9225	0.0003	0.0313	0,3086	45,0921	0.0056	0.1708
20	0,2835	26,8408	0.0062	0.4790	4,3967	18,9052	0.0862	2.0441
	0,221	26,9371	0.0009	0.1308	3,224	25,2273	0.0573	1.7558
10	1,3062	16,7981	0.0459	1.7048	10,5715	9,7460	0.1925	5.4244
	0,6846	16,936	0.0092	1.3311	10,4058	13,8192	0.1742	5.4109

Таким образом, использование разработанного алгоритма является более целесообразным для снижения $СКО_{\sigma}$, увеличения ОСПШ, а также определения фазовых и амплитудных ошибок в трактах ААР.

В третьей главе представлено описание имитационной модели ААР, позволяющей учесть влияние отклонения её параметров от номинальных на эффективность диаграммообразования. Модуль обработки аналоговых сигналов в частотном диапазоне 1.5-1.75 ГГц и мощностью -90 ÷ -20 дБм подавляет помехи от соседних каналов более, чем на 30 дБ, и более, чем на 43 дБ, для помех, выходящих за пределы рабочего диапазона частот. АЦП и квадратурный демодулятор, тактовые частоты которых составляют 32 МГц и 8 МГц соответственно, обрабатывают сигнал на ПЧ 40 МГц со скоростью передачи данных 1 Мбит/с и шириной канала, равной 2 МГц. Имитационная модель ААР, структурная схема одного тракта которой показана на рис. 3, выполнена на основе электронных компонентов с учетом основных характеристик (коэффициенты преобразований и шума, фазовые сдвиги), заложенных производителями.

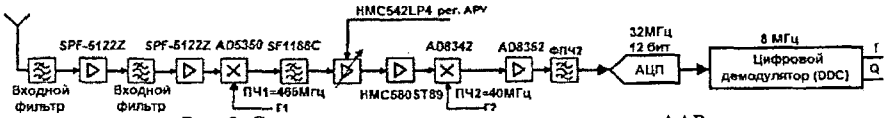


Рис. 3. Структурная схема одного канала модели ААР

Известно, что различные факторы, такие как изменения температурного режима, отказ работы отдельных элементов, отличие фактических параметров элементной базы от номинальных, оказывают существенное влияние на ОСПШ при пространственной фильтрации. Поэтому актуальным является исследование влияния отклонений номинальных величин параметров элементов на характеристики работы ААР. На основании имитационной модели ААР установлено, что отношение сигнал-помеха уменьшается более, чем на 60дБ при отклонении фактических параметров конструктивных элементов ААР от номинальных всего лишь на 1.7%. При такой относительной величине ошибки, к примеру, мал шумящий усилитель и усилитель первой промежуточной частоты (ПЧ) дают отклонения АЧХ на ± 0.5 дБ, ФЧХ – на $\pm 1^\circ$. При этом изменение АЧХ фильтра второй ПЧ достигает ± 1 дБ и ФЧХ – до $\pm 10^\circ$. Показано, что одним из способов борьбы с действием подобных негативных факторов может быть разработанный алгоритм автоматического калибрования.

Разработан экспериментальный макет четырехэлементной кольцевой ААР с имитацией прихода сигнала, частотой 3.14 МГц, азимутом 45° относительно первого АЭ. Для кольцевой АР с межэлементным расстоянием, равным 0.5λ , на которую приходит такой сигнал, фазовые сдвиги равны 0° , 0° , 180° и 180° для 1-го, 2-го, 3-го и 4-го АЭ соответственно. Для имитации такой АР спроектированы фильтры нижней частоты с фазовыми сдвигами, равными -8.25° , -7.84° , -191.5° и -193.53° для соответствующих АЭ, отражающими наличие фазовых ошибок в каналах; в макете также присутствуют амплитудные ошибки, равные -4.67 дБ, -4.65 дБ, -4.762 дБ и -4.77 дБ для соответствующих каналов. На рис. 5 представлены пеленгационные характеристики алгоритмов MUSIC, Фридландер-Вайса и предложенного алгоритма после обработки выходных данных макета ААР.

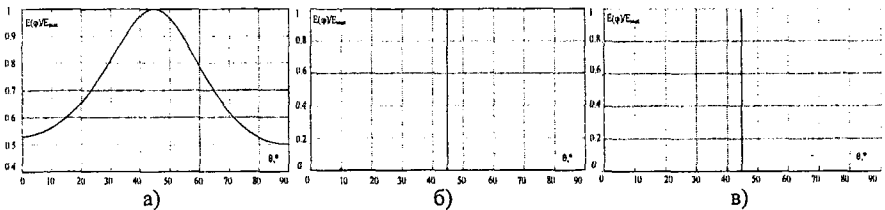


Рис. 5. Пеленгационные характеристики алгоритмов
а) MUSIC б) Фридландер-Вайса в) Предложенный

Из характеристик на рис. 5 видно, что автокалибровочные алгоритмы имеют более отчетливые пики, чем метода MUSIC, благодаря способности обнаруживать ошибки, поэтому проводить оценки угловых координат ИРИ с их помощью предпочтительней, чем традиционными алгоритмами, поскольку

пиковое значение можно найти быстрее и точнее. Учитывая сложность математического аппарата алгоритмов автоматического калибрования, для проведения модельных исследований многоканальных антенных систем, в каналах которых присутствуют аналоговые рассогласования, разработан программный пакет «Autocalibration Adaptant v1.0».

В итоге показано, что автокалибровочными алгоритмами, в том числе предложенным, возможно устранять амплитудно-фазовые сдвиги в каналах реальных систем, возникающие по причине изменений температуры, отказов и старения элементов электрических цепей.

В четвертой главе исследовано влияние недостаточного количества отсчетов входных данных, присутствия в этих отсчетах компонентов полезного сигнала, смещающейся по угловой координате помехи, а также многолучевого распространения радиоволн на эффективность функционирования различных алгоритмов диаграммообразования.

В частности, проведена сравнительная оценка точности алгоритмов определения углов прихода радиосигналов в условиях многолучевого распространения в составе кольцевой и линейной АР. Показано, что пеленги не зависят от числа рассеивателей и типа алгоритма (проецирования подпространств, собственноструктурные и несобственноструктурные), но определяются угловым разбросом переотраженных компонентов исходного сигнала. Помимо этого, использование линейных АР приводит к большим отклонениям от истинных угловых координат ИРИ, чем кольцевых (СКО_α ≈ 11° и 3.5° для соответствующих типов АР из восьми АЭ с межэлементным расстоянием 0.5λ, при излучении сигналов с азимутами 30° и 70°, угловым разбросе, равном 25° и в присутствии 10 рассеивателей).

Для компенсации вышеописанных эффектов применяются алгоритмы формирования ДН с расширенными нулями линейной АР Мэйлу-Затмана [Mailloux R.J., Zatman M.], Тафернера [Taferner M.A.], Гершмана [Gershman A.B.] и Рибо [Riba J., Goldberg J., Vazquez G.] при дополнительной диагональной регуляризации матрицы \hat{R} [Carlson B.D.]. Сутью данных алгоритмов является введение дополнительных условий получения весовых коэффициентов, таких как предположение о наличии множества дополнительных источников сигнала (алгоритм Мэйлу-Затмана), оконное сглаживания направляющих векторов (алгоритм Тафернера), условие равенства нулю производной ДН (алгоритм Гершмана) или усреднение пространственной корреляционной матрицы по координатам радиосигналов за определенный промежуток времени (алгоритм Рибо).

Для сравнения описанных средств повышения защищенности ДН были проведены численные оценки ОСПШ в условиях подвижной помехи (ОСПШshift), а также многолучевого распространения (ОСПШmult) (табл. 3 и 4, где для ОСПШshift смещение помехи составляет -8°, а для ОСПШmult имеются 15 рассеивателей с угловым разбросом, равным 25°). Линейная АР состояла из восьми АЭ с межэлементным расстоянием 0.5λ при воздействии сигналов с азимутами 20° и -20° (помеха) относительно оси, проведенной от

центра AP. Производилась регуляризация матрицы \hat{R} на 10 дБ, при этом $K = 50$. ОСПШ определялось как отношение мощности всех компонентов полезного сигнала к мощности всех компонентов помех и шума [Hugl K.].

Таблица 3.

ОСШ, дБ	SMI		Алгоритм Мэйлу-Затмана		Алгоритм Тафернера	
	ОСПШshift, дБ	ОСПШmult, дБ	ОСПШshift, дБ	ОСПШmult, дБ	ОСПШshift, дБ	ОСПШmult, дБ
30	5,2582	-39,3870	12,4844	2,4992	28,6104	15,2457
20	13,6627	-29,7242	14,8077	0,2662	26,0339	16,2131
10	14,1202	-19,2346	14,5783	-6,382	17,1537	23,1796
5	12,0779	-13,9499	12,4386	-8,2151	12,4615	21,3999

Таблица 4.

ОСШ, дБ	Алгоритм Гершмана		Алгоритм Рыба	
	ОСПШshift, дБ	ОСПШmult, дБ	ОСПШshift, дБ	ОСПШmult, дБ
30	10,7207	-29,2382	34,0214	-0,1038
20	16,2276	-19,6490	27,8666	-0,0648
10	14,5884	-11,3634	18,5122	0,2762
5	12,1564	-7,7125	9,3714	0,0202

Из табл. 3 и 4 видно, что алгоритмы формирования ДН с расширенными нулями позволяют ослаблять помеху, которая находится за пределами нуля, сформированного алгоритмом обращения выборочной корреляционной матрицы (SMI). Однако для полного подавления как компонентов многолучевого распространения, так и подвижной помехи, необходим алгоритм Тафернера. Этот алгоритм отличается тем, что использует пространственную корреляционную матрицу, полученную без учета усредненных данных с выходов AP, распределение поля в раскрыве которой отличается от номинального вследствие наличия переотраженных сигналов.

Предложенная процедура диаграммообразования, устраняющая вышеописанные факторы, для кольцевой AP использует предположение о непрерывном распределении источников помеховых сигналов в пространстве. Выражения коэффициентов корреляции между элементами кольцевой AP R_G и R_U с учетом гауссовского и равномерного законов распределений ИРИ соответственно выглядят следующим образом [Tsai J.A., Woerner B.D.]

$$R_G(p, q) \approx k_e \exp(-jZ_c \sin(\gamma + \theta)) \exp\left(-\frac{Z_c \sigma \cos(\phi + \gamma)^2}{2}\right), \quad (3)$$

$$R_U(p, q) \approx \exp(-jZ_c \sin(\gamma + \theta)) \text{sinc}(-Z_c \Delta \cos(\phi + \gamma)), \quad (4)$$

где ϕ – средний угол прихода сигнала, σ – СКО, 2Δ – диапазон углов вокруг центральной угловой координаты ϕ , k_e – функция ошибок, $Z_c = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2}$, $Z_1 = 2\pi \frac{R}{\lambda} [\cos(\Psi_p) - \cos(\Psi_q)]$, $Z_2 = 2\pi \frac{R}{\lambda} [\sin(\Psi_p) - \sin(\Psi_q)]$, $\sin(\gamma) = Z_1 / Z_c$, $\cos(\gamma) = Z_2 / Z_c$, p и q – номера антенных элементов. Приближение сохраняется при условии $\sigma \leq 10^\circ$, $\Delta \leq 10^\circ$.

На основании формул (3) и (4) можно записать аналитическое выражение для вычисления вектора весовых коэффициентов для формирования ДН с

расширенными провалами в направлениях помех

$$\bar{\mathbf{w}}^{circ} = (\mathbf{R}_1 + \sum_{m=2}^M \bar{\mathbf{R}}_m + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \bar{\mathbf{a}}(\theta_1),$$

где $\mathbf{R}_1 = \bar{\mathbf{a}}(\theta_1) \bar{\mathbf{a}}(\theta_1)^H$ – пространственная корреляционная матрица полезного сигнала, $\bar{\mathbf{R}}_m$ – пространственная корреляционная матрица распределенной в пространстве m -й помехи, pq -й элемент которой получен из (3) или (4).

В табл. 5 приведены результаты численной оценки ОСПШ предложенного алгоритма диаграммообразования и алгоритма SMI с регуляризацией, равной 10 дБ, в присутствии подвижной помехи (ОСПШshift, смещение равно -8°) и в условиях многолучевого распространения (ОСПШmult, 15 рассеивателей и угловой разброс равен 25°). Исследование проводилось для восьмизлементной кольцевой АР с межэлементным расстоянием 0.5λ . Сигналы имели азимуты 20° и 60° (помеха) относительно первого АЭ. При этом для смещенной помехи $\sigma = 4.6^\circ$ и $\Delta = 8^\circ$, так как $\sigma \approx 0.577\Delta$; для многолучевой среды взяты максимальные значения $\sigma = 10^\circ$ и $\Delta = 10^\circ$, удовлетворяющие (3) и (4).

Таблица 5.

ОСПШ, дБ	SMI		Равномерное распр.		Гауссовское распр.	
	ОСПШshift, дБ	ОСПШmult, дБ	ОСПШshift, дБ	ОСПШmult, дБ	ОСПШshift, дБ	ОСПШmult, дБ
30	12,5873	-10,9007	25,6293	28,7946	19,2609	25,2900
20	12,3791	0,2544	19,5318	26,6190	13,4668	23,6288
10	10,0254	10,0575	12,8784	21,318	12,813	15,9885
5	7,171	12,9596	9,9846	16,2617	9,9738	16,7783

При построении ДН предложенным способом пространственное подавление смещенной помехи достаточно высокое (табл. 5). Однако для ДН на основе равномерного типа распределения ИРИ значения ОСПШ оказались выше, чем на основе гауссовского типа для ОСШ больше 5 дБ, что указывает на более глубокий провал нуля ДН. Впрочем, для диаграммообразования на основе весовых коэффициентов $\bar{\mathbf{w}}^{circ}$ для обоих типов распределения способность к подавлению некоррелированного шума ниже, чем у традиционных алгоритмов, что является «платой» за расширение нулей ДН.

Таким образом, полученный алгоритм диаграммообразования позволяет формирование ДН кольцевой антенной решетки с увеличенным ОСПШ для нестационарной среды и среды с многолучевым распространением.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Автокалибровочные алгоритмы с условно-постоянной моделью ошибок в каналах ААР снижают среднеквадратическое отклонение оценок координат ИРИ, повышают выходное отношение мощности полезного сигнала к мощности помех и шума, а также определяют амплитудные и фазовые ошибки. Однако все они не являются идеальными для применения в составе ААР. Так алгоритм Фридландер-Вайса практически не изменяет СКО пеленгов и ОСПШ в присутствии амплитудных ошибок и зависит от значений угловых координат, определяемых на первом шаге итерации. Алгоритм Ванга-Кедзоу

при низких и средних значениях ОСШ значительно увеличивает СКО пеленгов и, как следствие, снижает ОСПШ. Алгоритм Эстели-Свиндлехарста-Оттерсона имеет самые большие СКО пеленгов.

2. Предложенный новый алгоритм автоматического калибрования является малочувствительным к ОСШ и устойчивым к ошибкам в каналах ААР, позволяя снизить 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 оценить амплитудные и фазовые ошибки рассогласования аналоговых каналов с точностью, превосходящей другие алгоритмы в 2-3 раза.

3. Разработана имитационная модель ААР на основе современной элементной базы электронных компонентов, учитывающая характеристики, заложенные производителями. Показано, что незначительные отклонения номиналов элементов на 1.7% приводят к значительному ухудшению рабочих характеристик ААР – снижению отношения сигнал/помеха более, чем на 60 дБ.

4. Использование алгоритмов автоматического калибрования в составе разработанной модели ААР показало, что они могут быть использованы для снижения влияния помех на качество полезного сигнала. Наилучшие результаты в этом продемонстрировал предложенный алгоритм автоматического устранения амплитудно-фазового рассогласования ААР.

5. Разработан экспериментальный образец ААР, позволяющий осуществлять процедуру диаграммообразования с использованием алгоритмов автоматического калибрования.

6. Реализованные алгоритмы Фридландер-Вайса, Ванга-Кедзоу и предложенный алгоритм в составе программного пакета «Autocalibration Adaptant v1.0» позволяют проводить калибрование АР в присутствии амплитудных и фазовых ошибок в каналах без использования дополнительных данных и устройств для линейной и кольцевой антенных решеток.

7. Алгоритм Тафернера показал большую способность подавлять подвижную помеху и интерферирующие радиосигналы, вызванные многолучевым распространением, повысив ОСПШ до значений 28.6 и 15.24 дБ для ОСШ 30 дБ при смещении помехи на 8° и разбросе рассеивателей на 25°, относительно других алгоритмов диаграммообразования с расширенными нулями линейных АР.

8. 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). Алгоритм, основанный на равномерном распределении, дал большее увеличение ОСПШ по сравнению с подходом, предполагающим гауссовское распределение.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нечаев Ю.Б. Оценка влияния параметров модуля первичной обработки на работу цифровой антенной решетки / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // *Нелинейный мир*. – 2010. – Ч. 1. – С. 77-82.

2. Нечаев Ю.Б. Оценка межсимвольных искажений аналогового тракта цифровой антенной решетки / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – № 2. – С. 94-101.

3. Нечаев Ю.Б. Оценка точности автокалибровочных методов определения координат источников радиоизлучения с условно-постоянной моделью амплитудно-фазовых ошибок в каналах цифровой антенной решетки / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Телекоммуникации. – 2011. – № 5. – С. 34-43.

4. Нечаев Ю.Б. Автокалибровочный алгоритм компенсации амплитудно-фазовых ошибок в каналах цифровой антенной решетки / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия : Физика. Математика. – 2011. – № 1. – С. 51-69.

5. Нечаев Ю.Б. Алгоритм формирования диаграммы направленности кольцевой антенной решетки, устойчивый к многолучевому распространению и нестационарным источникам помех / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 26-34.

6. Нечаев Ю.Б. Анализ алгоритмов формирования диаграммы направленности линейной антенной решетки, устойчивых к многолучевому распространению и нестационарным источникам помех / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 4. – С. 78-86.

7. Нечаев Ю.Б. Алгоритмы диаграммообразования адаптивных антенных решеток в условиях многолучевого распространения радиоволн / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Научные ведомости БелГУ. Серия : Информатика. – 2012. – № 1 (120). – Вып. 21/1. – С. 205-215.

8. Нечаев Ю.Б. Влияние полосового фильтра аналогового тракта цифровой антенной решетки на межсимвольные искажения / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Информатика : проблемы, методология, технологии : мат. X Междунар. науч.-методич. конф., Воронеж, 11-12 фев. 2010 г. – Воронеж, 2010. – Т. 2. – С. 64-65.

9. Нечаев Ю.Б. Выбор элементов модуля первичной обработки аналогового сигнала цифровой антенной решетки / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Радиолокация, навигация, связь (RLNC – 2010) : сб. тр. XVI Междунар. науч.-тех. конф., Воронеж, 13-15 апр. 2010 г. – Воронеж, 2010. – Т. 2. – С. 1402-1413.

10. Нечаев Ю.Б. Оценка отклонения определения угла прихода радиосигнала автокалибровочных методов пеленгации радиоизлучения с условно-постоянной моделью амплитудно-фазовых ошибок в каналах цифровой антенной решетки / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Физика и технические приложения волновых процессов : сб. тр. IX Междунар. науч.-тех. конф., Челябинск, 13-17 сент. 2010 г. – Челябинск, 2010. – С. 35-36.

11. Пешков И.В. Среднеквадратическое отклонение определения координат источников радиоизлучения автокалибровочных методов в слабой

шумовой обстановке / И.В. Пешков // Информатика : проблемы, методология, технологии : мат. XI Междунар. науч.-методич. конф., Воронеж, 10-11 фев. 2011 г. – Воронеж, 2011. – Т. 2. – С. 167-171.

12. Нечаев Ю.Б. Автокалибровка цифровых антенных решеток в условиях многолучевого распространения радиоволн / Ю.Б. Нечаев, Е.С. Макаров, И.В. Пешков // Радиолокация, навигация, связь (RLNC – 2011) : сб. тр. XVII Междунар. науч.-тех. конф., Воронеж, 12-14 апр. 2011 г. – Воронеж, 2011. – Т. 2. – С. 1522-1534.

13. Нечаев Ю.Б. Параметрическая автокалибровка цифровых антенных решеток / Ю.Б. Нечаев, Е.С. Макаров, И.В. Пешков // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия : Цифровая обработка сигналов и её применение. – М., 2011. – Вып. : XIII, Т. 1. – С. 207-210.

14. Нечаев Ю.Б. Повышение эффективности работы цифровой антенной решетки в нестационарных условиях / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Физика и технические приложения волновых процессов : сб. тр. X Междунар. науч.-тех. конф., Самара, 11-17 сент. 2011 г. – Самара, 2011. – С. 90.

15. Нечаев Ю.Б. Диаграммообразование цифровой антенной решетки, устойчивое к подвижному источнику помехи / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Компьютерные науки и технологии (КНиТ-2011) : сб. тр. второй Междунар. науч.-тех. конф., Белгород, 3-5 окт. 2011 г. – Белгород, 2011. – С. 636-640.

16. Нечаев Ю.Б. Реализация алгоритмов автоматического калибрования цифровой антенной решетки / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций (ПТиТТ-2011) : сб. тр. XII Междунар. науч.-тех. конф., Казань, 21-24 ноя. 2011 г. – Казань, 2011. – С. 385-386.

17. Пешков И.В. Влияние случайных дестабилизирующих воздействий на алгоритмы пространственной обработки сигналов цифровых антенных решеток / И.В. Пешков // Информатика : проблемы, методология, технологии : мат. XII Междунар. науч.-методич. конф., Воронеж, 9-10 фев. 2012 г. – Воронеж, 2012. – Т. 1. – С. 313-314.

18. Autocalibration Adaptant v1.0 : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Ю.Б. Нечаев, Д.Н. Борисов, И.В. Пешков. – № 2011616449 ; заявл. 25.08.2011 ; внесена в Реестр программ для ЭВМ 10.01.2012 ; рег. № 2012610061.

Работы [1-7] опубликованы в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций.

Подписано в печать 16.04.2012. Формат 60 x 84/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,0 Тираж 120 экз. Заказ №1015

Отпечатано в типографии Воронежского ЦНТИ – филиала ФГБУ «РЭА»
Минэнерго России 394036, г. Воронеж, пр. Революции, 30.